UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Estudio experimental de maniobras de incorporación en disposiciones oblicuas. Aplicación práctica para la mejora del enlace de la CV-35 con la CV-336, en San Antonio de Benagéber (Valencia).

TOMO I

PROYECTO FINAL DE CARRERA TIPO II
TITULACIÓN:
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
PRESENTADO POR:
Javier Contreras Bueno
DIRIGIDO POR:
Prof. D. Alfredo García García
VALENCIA, mayo de 2006

Índice de contenido

Introducción 1

1 Antecedentes 2

2 Objeto de estudio 4
2.1 Introducción 4
2.2 El problema 4
2.3 Contexto 5
2.4 Elección del modelo 5
2.5 Variables a incluir en el modelo 6
2.6 Esquema general del programa informático 9

3 Resumen de contenidos 10

Estado del arte 12

4 Sistemas y modelos en ingeniería 13
4.1 Visión sistémica de la conducción 13
4.2 Objetivo: comprender el sistema 13
4.3 Nociones de la teoría de sistemas 15
4.4 Elementos del sistema de la conducción 17
4.5 Modelos en Ingeniería 18
4.6 Microsimulación de sistemas de tráfico 20
4.7 Conclusión 23

5 Nudos 24
5.1 Definiciones 24
5.2 Importancia 25
5.3 Criterios básicos de diseño 26
5.4 Opciones para el conductor en el nudo 28
5.5 Tipos de ramales de giro 29
5.6 Tipos de nudos 31
5.7 Catálogo de nudos 32
5.8 Cruces 36
5.9 Incorporaciones 40
5.10 Conclusión 59

6 Oblicuidad 60
6.1 Concepto 60
6.2 Posibles interpretaciones 60
6.3 Ángulos 62
6.4 Ángulo del vehículo 64
6.5 Relaciones 64
6.6 Problemas relacionados con la oblicuidad 64
6.7 Conclusión 73

7 Visibilidad en intersecciones 74
7.1 Introducción 74
7.2 Normativa española 74
7.3 Normativa en EEUU 78
7.4 Efecto de la oblicuidad 81
7.5 Conclusiones 83

8 Visión del conductor 84
8.1 Introducción 84
8.2 Capacidades visuales relacionadas con la conducción 84
8.3 Experimento con conductores con limitaciones visuales 93
8.4 Conclusión 100

9 Campo visual del conductor en el vehículo 101
9.1 El ángulo muerto 101
9.2 Espejos retrovisores 103
9.3 Ángulo cubierto por los retrovisores 114
9.4 Conclusión 134

10 Dispositivos de ayuda a la conducción 135
10.1 Introducción 135
10.2 Objetivos a alcanzar 135
10.3 Esquema de funcionamiento 143
10.4 Elementos constituyentes 144
10.5 Tipos 145
10.6 Sensores de detección 148
10.7 Instalaciones externas al vehículo 151
10.8 Procesamiento de la información 152
10.9 Interfaz de usuario 155
10.10 Estimaciones coste-beneficio sobre su implantación 158
10.11 Líneas de investigación futuras 161
10.12 Conclusión 166

11 Características de los vehículos 167
11.1 Introducción 167
11.2 Dimensiones 167
11.3 Giro de vehículos largos y articulados 174

12 Accidentalidad 178
12.1 Introducción 178
12.2 Técnicas para afrontar el problema 180
12.3 Factores implicados 183
12.4 Estadísticas 185
12.5 Accidentes en incorporaciones y cambios de carril 192
12.6 Modelos de estimación de la accidentalidad 205
12.7 Análisis de factores relacionados con la investigación 213
12.8 Otras formas de medir la seguridad 218
12.9 Conclusión 220

13 Conductores mayores **221**
13.1 Introducción 221
13.2 Limitaciones fisiológicas 221
13.3 Patrones de conducción 226
13.4 Estadísticas de accidentalidad 229
13.5 Soluciones al problema 232
13.6 Conclusión 234

14 Comportamiento del conductor **235**
14.1 La tarea de la conducción 235
14.2 Tiempo de percepción-reacción 235
14.3 Comportamiento del conductor al decidir su velocidad 240
14.4 Comportamiento ante una incorporación 245
14.5 Modelos de aceptación del hueco 248
14.6 Trayectoria seguida en un cambio de carril 259
14.7 Conclusión 263

15 Restitución de perspectivas **264**
15.1 Introducción 264
15.2 La perspectiva cónica 264
15.3 Transformación inversa a la perspectiva 272
15.4 La homología plana 274
15.5 Homología inversa 279
15.6 La doble homología 283
15.7 Conclusión 288

Diseño experimental **289**

16 Identificación de factores a estudiar **290**
16.1 Introducción 290
16.2 Factores relacionados con incorporaciones 290
16.3 Medios necesarios 302
16.4 Tabla resumen 310
16.5 Selección de factores a estudiar 315
16.6 Comentario final 322

17 Diseño del proceso de recogida de datos **323**
17.1 Introducción 323
17.2 Cámaras en un punto alto cercano 324
17.3 Cámaras para el interior de los vehículos 327
17.4 Obtención de la geometría 342
17.5 Emplazamientos posibles 348
17.6 Conclusión 363

18 Estudio preliminar de grabaciones **364**
18.1 Introducción 364
18.2 Descripción general de las grabaciones 365
18.3 Los emplazamientos 366
18.4 Factores analizados 366

18.5 Factores no analizados 374
18.6 Análisis estadístico de la muestra 375
18.7 Conclusiones 398

19 Software para la restitución 400
19.1 Descripción general 400
19.2 Instalación 401
19.3 Menú archivo 403
19.4 Menú Ayuda 404
19.5 Proyectos y capturas 405
19.6 Menú Captura 406
19.7 La barra de controles de video 407
19.8 Seleccionando la visualización más adecuada 408
19.9 Definiendo referencias 410
19.10 Calculando puntos 413
19.11 Menú edición 415
19.12 Estrategias para mejorar los resultados 415
19.13 Permutaciones 417
19.14 Robustez del programa 420
19.15 Establecer opciones del programa 421
19.16 Aplicación a ubicaciones concretas 422
19.17 Conclusiones 426

20 Ejecución experimental 427
20.1 Introducción 427
20.2 Lista de acciones a realizar 427
20.3 Campaña de recogida de datos experimentales 429
20.4 Ubicaciones de estudio 430
20.5 Conclusión 432

Análisis de los resultados experimentales 433

21 Análisis de los resultados 434
21.1 Introducción 434
21.2 Descripción de la muestra 434
21.3 Mirada del conductor 444
21.4 Trayectoria seguida 458
21.5 Factores que condicionan la elección de la maniobra 468
21.6 Dimensiones de los vehículos 486
21.7 Volumen de tráfico 489
21.8 Conflictividad 491
21.9 Conclusión 498

22 Modelos explicativos del comportamiento 499
22.1 Introducción 499
22.2 Comportamiento del conductor que se incorpora 499
22.3 Comportamiento del conductor que hace un cruce 503
22.4 Trayectoria del conductor y uso del retrovisor 509
22.5 Conclusión 510

23 Software para la aplicación práctica 511
23.1 Descripción general 511
23.2 Instalación 512
23.3 Primera utilización del programa 514
23.4 Menú Archivo 515
23.5 Menú Ayuda 516
23.6 Definiendo la geometría 517
23.7 Introduciendo geometrías complejas 519
23.8 Definiendo vehículos 528
23.9 Seleccionando la visualización más adecuada 529
23.10 Calculando 531
23.11 Configuración del programa 533
23.12 Descripción interna del programa 534
23.13 Conclusión 539

24 Aplicación práctica de los resultados 540
24.1 Introducción 540
24.2 Análisis pseudo-estático 540
24.3 Análisis dinámico 544
24.4 Consecuencias prácticas 551
24.5 Conclusión 553

Aplicación práctica al enlace de la CV-35 con la CV-336 554

25 Memoria 555
25.1 Datos previos 555
25.2 Descripción del proyecto 555
25.3 Anejos 560

26 Planos 594
26.1 Ubicación 595
26.2 Situación actual. Planta general 596
26.3 Situación actual. Foto aérea 597
26.4 Situación actual. Planta del punto 1 598
26.5 Situación actual. Planta de los puntos 2 y 3 599
26.6 Situación actual. Planta del punto 4 600
26.7 Situación actual. Planta de los puntos 5 y 6 601
26.8 Situación actual. Planta del punto 7 602
26.9 Planta de obras de fábrica y estructuras 603
26.10 Obra de drenaje nº 1 604
26.11 Obra de drenaje nº 2 605
26.12 Obra de drenaje nº 3 606
26.13 Obra de drenaje nº 4 607
26.14 Estructura 608
26.15 Alternativa 1 para el punto 1 609
26.16 Alternativa 1 para el punto 2 610
26.17 Alternativa 2 para el punto 2 611
26.18 Alternativa 3 para el punto 2 612

26.19 Alternativa 1 para el punto 4 613
26.20 Alternativa 1 para el punto 6 614
26.21 Alternativa 1 para el punto 7 615
26.22 Alternativa 2 para el punto 7 616
26.23 Alternativa 3 para el punto 7 617
26.24 Alternativa 4 para el punto 7 618
26.25 Sección tipo en ramales de nueva construcción 619
26.26 Sección tipo en ampliaciones de firme 620
26.27 Solución de proyecto. Planta del punto 1 621
26.28 Solución de proyecto. Planta del punto 2 622
26.29 Solución de proyecto. Planta del punto 4 623
26.30 Solución de proyecto. Planta del punto 6 624
26.31 Solución de proyecto. Planta del punto 7 625

27 Presupuesto 626
27.1 Mediciones 626
27.2 Cuadro de precios 630
27.3 Presupuesto 637

Conclusión 639

28 Conclusión 640
28.1 Introducción 640
28.2 Necesidad de evitar la oblicuidad 640
28.3 Estudio experimental 641
28.4 Resultados experimentales 642
28.5 Aplicación práctica 642

29 Propuestas para investigaciones futuras 643
29.1 Introducción 643
29.2 Ampliar datos sobre las incorporaciones oblicuas 643
29.3 Incorporaciones por la derecha 644
29.4 Campo visual directo 644
29.5 Campo visual por los retrovisores 644
29.6 Perfeccionamiento del programa Restit 645
29.7 Perfeccionamiento del programa ValSIM 645
29.8 Accidentalidad en España 646

30 Referencias bibliográficas 647

Anexos 661

A1 Listado de resultados experimentales 662
A1.1 Lista de datos del estudio preliminar 662
A1.2 Lista de datos del estudio experimental 708

Índice de figuras

Figura 2-1.	Campo visual del conductor.	4
Figura 2-2.	Problema en el ángulo muerto derecho	5
Figura 2-3.	Problema en el ángulo muerto izquierdo	5
Figura 4-1.	Flujo de información en el modelo de tráfico	18
Figura 4-2.	Captura de pantalla del programa CORSIM	21
Figura 4-3.	Captura de pantalla del programa SimTraffic	22
Figura 4-4.	Captura de pantalla del programa VISSIM	22
Figura 4-5.	Captura de pantalla del simulador ValSim	23
Figura 5-1.	Foto de una intersección	26
Figura 5-2.	Foto de un enlace	26
Figura 5-3.	Esquema de divergencia	27
Figura 5-4.	Esquema de convergencia	27
Figura 5-5.	Esquema de cruce	27
Figura 5-6.	Área de conflicto y oblicuidad	28
Figura 5-7.	Esquema de opciones en un nudo	30
Figura 5-8.	Esquema de giro a derechas directo	31
Figura 5-9.	Esquema de giro a izquierdas directo	31
Figura 5-10.	Esquemas de giros a izquierdas semidirectos	32
Figura 5-11.	Esquemas de giros a izquierdas indirectos	32
Figura 5-12.	Esquema de un lazo (giro a izquierdas indirecto)	32
Figura 5-13.	Esquema de nudo en cruz	33
Figura 5-14.	Esquema de nudo en “x”	33
Figura 5-15.	T sin canalización	34
Figura 5-16.	T canalizada con una lágrima en la carretera secundaria	34
Figura 5-17.	T con separación de giro a derechas desde la secundaria	34
Figura 5-18.	T con mediana en vía principal	34
Figura 5-19.	Y con separación de puntos de conflicto	34
Figura 5-20.	Cruz sin canalización	35
Figura 5-21.	Cruz con poca canalización	35
Figura 5-22.	Cruz con carriles de giro a izquierda en la principal	35
Figura 5-23.	Cruz con total canalización	35
Figura 5-24.	Cruz tipo glorieta partida	36
Figura 5-25.	Enlace en trompeta	36
Figura 5-26.	Trébol completo	37
Figura 5-27.	Diamantes	37
Figura 5-28.	Carril central de giro a izquierda	38
Figura 5-29.	Oblicuidad a derechas y a izquierdas	38
Figura 5-30.	Triángulo de visibilidad propuesto por Gattis y Low	40
Figura 5-31.	Reducción de la visibilidad en función de la oblicuidad, para turismos, según Son-Young-Tae y otros (2002)	41
Figura 5-32.	Intersección con giro a derechas mediante carril de aceleración	43
Figura 5-33.	Intersección con giro a derechas mediante cuña de entrada	43
Figura 5-34.	Tipos de carriles de aceleración	44

Figura 5-35.	Croquis del área de despeje en la punta de la incorporación	45
Figura 5-36.	Esquema de una incorporación oblicua sencilla	46
Figura 5-37.	Intersección canalizada con cuña de incorporación	47
Figura 5-38.	Esquema de las cuñas de incorporación	47
Figura 5-39.	Diseño con una curva de radio constante	48
Figura 5-40.	Diseño con una curva de 3 centros	48
Figura 5-41.	Diseño con cuña de cotangente 45	49
Figura 5-42.	Intersección sin canalizar con cuña, oblicua a 150g	50
Figura 5-43.	Ramal de incorporación con giro de 100g	51
Figura 5-44.	Ramal de incorporación con giro de 150g	52
Figura 5-45.	Diseño de giro a derechas de 90º, según la AASHTO	55
Figura 5-46.	Diseño de giro a derechas, canalizado, de 90º, según la AASHTO	57
Figura 5-47.	Diseño de una intersección no canalizada según "California DOT Design Manual"	58
Figura 5-48.	Esquema de una confluencia mostrando la sección de referencia.	59
Figura 6-1.	Intersección en T con canalización deficiente	61
Figura 6-2.	Intersección en Y con ramales de incorporación y cruce sin oblicuidad	61
Figura 6-3.	Posibles ángulos entre el ramal y la vía principal	62
Figura 6-4.	Posibles ángulos entre el ramal y la vía principal (bis)	63
Figura 6-5.	Ángulo entre el vehículo y la vía principal	64
Figura 6-6.	Fotos de conductores girando su tronco y cuello para ganar visibilidad	65
Figura 6-7.	Esquema donde se muestra que en intersecciones oblicuas el conductor debe girar mucho la cabeza	70
Figura 6-8.	Camión frente a una intersección oblicua en la que no tiene visibilidad	71
Figura 6-9.	Persona mayor al volante	71
Figura 6-10.	Imagen de la zona conflictiva en una intersección perpendicular y otra oblicua	72
Figura 6-11.	Invasión del carril contrario de un vehículo largo al realizar un giro en una intersección oblicua	72
Figura 7-1.	Triángulos de visibilidad para la instrucción 3.1-IC española	76
Figura 7-2.	Triángulos de visibilidad según las "Recomendaciones para el Proyecto de Intersecciones" de la Dirección General de Carreteras	77
Figura 7-3.	Esquema del caso III de los triángulos de visibilidad	78
Figura 7-4.	Esquema del efecto de la oblicuidad según las "Recomendaciones para el Proyecto de Intersecciones" de la Dirección General de Carreteras	82
Figura 7-5.	Esquema del efecto de la oblicuidad según "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets", de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	82
Figura 8-1.	Relación entre el campo de visión y la velocidad.	87
Figura 8-2.	Campo visual del conductor	88

Figura 8-3.	Visión del sujeto durante el UFOV test.	90
Figura 8-4.	Efectividad de los tests para discriminar a sujetos con probabilidad de sufrir accidentes basándose en los accidentes sufridos.	91
Figura 8-5.	Gafas para disminuir el campo visual.	94
Figura 8-6.	Errores en la detección de señales de tráfico, según el campo visual del conductor	94
Figura 8-7.	Errores al evitar obstáculos en la carretera, según el campo visual del conductor	95
Figura 8-8.	Velocidad adoptada, en función del campo visual del conductor	95
Figura 8-9.	Distancia de parada, en función del campo visual del conductor	96
Figura 8-10.	Errores en la maniobra entre conos, según el campo visual del conductor	96
Figura 8-11.	Tiempo invertido en la maniobra entre conos, según el campo visual del conductor	97
Figura 8-12.	Errores en cambios de sentido, según campo visual del conductor	97
Figura 8-13.	Tiempo en realizar un cambio de sentido, según el campo visual del conductor	98
Figura 8-14.	Errores en el centrado del vehículo, según el campo visual del conductor	98
Figura 8-15.	Tiempo en completar un circuito, según el campo visual del conductor	99
Figura 8-16.	Puntuación total para diferentes campos visuales	99
Figura 9-1.	Esquema sobre el campo de visión del conductor	101
Figura 9-2.	Ejemplo de vehículo en el ángulo muerto	102
Figura 9-3.	Disposiciones oblicuas en las que la vía principal queda en el ángulo muerto	103
Figura 9-4.	Ángulo cubierto por cada uno de los espejos	103
Figura 9-5.	Espejo convexo situado encima de uno plano convencional	104
Figura 9-6.	Áreas cubiertas por el retrovisor, según dos orientaciones posibles	105
Figura 9-7.	Visión ampliada en el costado derecho al colocar un espejo convexo circular	106
Figura 9-8.	Visión ampliada en el costado izquierdo al situar un espejo convexo rectangular	107
Figura 9-9.	Campo de visión con retrovisor normal	108
Figura 9-10.	Campo de visión con retrovisor panorámico	108
Figura 9-11.	Área cubierta por un retrovisor panorámico	109
Figura 9-12.	Área cubierta por un retrovisor convexo	109
Figura 9-13.	Visión con un espejo convexo complementario	110
Figura 9-14.	Visión con un espejo compuesto suplementario	110
Figura 9-15.	Retrovisor central panorámico y convexo	110
Figura 9-16.	Espejo central compuesto	111
Figura 9-17.	Secuencia de un adelantamiento vista mediante “Smart View Mirror”	111

Figura 9-18.	Espejos convexos rectangulares a situar sobre los laterales planos	112
Figura 9-19.	Espejo lateral convexo yuxtapuesto	112
Figura 9-20.	Ejemplo de espejo interior auxiliar rectangular convexo	113
Figura 9-21.	Ejemplo de espejo interior auxiliar circular convexo	113
Figura 9-22.	Ángulos que se pretenden estudiar	114
Figura 9-23.	Dispositivo de medida utilizado	115
Figura 9-24.	Corquis del dispositivo de medida utilizado	115
Figura 9-25.	Ejemplo de toma de datos del ángulo por el retrovisor izquierdo	115
Figura 9-26.	Ejemplo de toma de datos del ángulo por el retrovisor derecho	116
Figura 9-27.	Ángulos de visión obtenidos por cada uno de los retrovisores, en diferentes posiciones	117
Figura 9-28.	Ángulo por el espejo retrovisor izquierdo, en posición retrasada, en función del tipo de vehículo.	118
Figura 9-29.	Datos obtenidos, en función del tipo de vehículo	119
Figura 9-30.	Ángulo cubierto por el retrovisor izquierdo, en posición retrasada, según el sexo	119
Figura 9-31.	Ángulo cubierto por el retrovisor izquierdo, en posición retrasada, según el sexo	120
Figura 9-32.	Ángulo por el retrovisor izquierdo, en posición retrasada, por edades	120
Figura 9-33.	Modelo de regresión de 2º grado, entre el ángulo por retrovisor y la edad	121
Figura 9-34.	Ángulo a través del espejo retrovisor izquierdo, en función de la posición del asiento	122
Figura 9-35.	Ángulo de visión por el retrovisor, en función de la convexidad del mismo	123
Figura 9-36.	Ángulo por el retrovisor izquierdo, en función de la convexidad del mismo	123
Figura 9-37.	Valores medios obtenidos en la medida del ángulo por el retrovisor izquierdo, en posición adelantada, según el modelo del vehículo	124
Figura 9-38.	Distribución acumulada ponderada para el retrovisor izquierdo	125
Figura 9-39.	Distribución acumulada ponderada para el retrovisor derecho	125
Figura 9-40.	Ángulo que pretenden determinar Gattis y Low en su estudio	126
Figura 9-41.	Esquema diseñado para la investigación de Gattis y Low	127
Figura 9-42.	Trazado de líneas auxiliares en el suelo para el experimento	128
Figura 9-43.	Posición del jalón para el experimento	129
Figura 9-44.	Triángulo de visibilidad en disposiciones oblicuas	130
Figura 9-45.	Valores de VA medidos en turismos	131
Figura 9-46.	Valores de VA medidos en camiones rígidos	131
Figura 9-47.	Valores de VA medidos en camiones articulados	131

Figura 9-48.	Comparación entre visibilidad disponible y necesaria, para camiones rígidos	132
Figura 9-49.	Campo de visión del conductor en su vehículo	133
Figura 9-50.	Diagrama resumen de los datos recopilados	134
Figura 10-1.	Principales campos de aplicación de los CAS	136
Figura 10-2.	CAS evitando un accidente por alcance	136
Figura 10-3.	CAS evitando un accidente por salida de carretera	137
Figura 10-4.	CAS evitando accidentes en cambios de carril e incorporaciones	138
Figura 10-5.	CAS evitando accidentes en intersecciones	138
Figura 10-6.	CAS complementando la visión del conductor	139
Figura 10-7.	CAS enviando un mensaje de alerta por pérdida de estabilidad	140
Figura 10-8.	CAS evitando un accidente por somnolencia	140
Figura 10-9.	Esquema de funcionamiento de un dispositivo de ayuda a la conducción (CAS)	143
Figura 10-10.	Partes constituyentes de un sistema de ayuda a la conducción	145
Figura 10-11.	Sensor detectando un vehículo en el ángulo muerto	145
Figura 10-12.	Áreas cubiertas por los dispositivos de ayuda a la conducción	146
Figura 10-13.	Ángulo de detección necesario para una maniobra de incorporación	147
Figura 10-14.	Equipo formado por una videocámara y un monitor	148
Figura 10-15.	Ejemplo de situación de las videocámaras en un vehículo	149
Figura 10-16.	ALIRT Blind Stop Detector	150
Figura 10-17.	Esquema de funcionamiento del procesador	152
Figura 10-18.	Ejemplo de señal recibida por un CAS y los umbrales de detección	153
Figura 10-19.	Criterio distancia-velocidad relativa para generar una alerta	154
Figura 10-20.	El dispositivo debe poder situar cada obstáculo detectado en el carril correspondiente	154
Figura 10-21.	Interfaz situado en el panel frontal del vehículo	155
Figura 10-22.	Interfaz situado bajo el retrovisor lateral	155
Figura 10-23.	Interfaz colocado junto al retrovisor lateral	156
Figura 10-24.	Interfaz con indicación de distancia al obstáculo, y señal sonora	156
Figura 10-25.	Interfaz formada por un panel traslúcido, advirtiendo de la proximidad de un “stop”	157
Figura 10-26.	Beneficio de implantación de CAS, en función de su coste	160
Figura 10-27.	Turismo equipado con estos sistemas	164
Figura 10-28.	Camión con los sistemas implementados	164
Figura 10-29.	Vehículo de transporte público con los sistemas instalados	165
Figura 10-30.	Aplicación de estos sistemas a maquinaria pesada	166
Figura 11-1.	Frecuencia de aparición de los distintos segmentos, dentro del parque nacional	169
Figura 11-2.	Distribución de la variable “largo” en la población total	169
Figura 11-3.	Largo de los vehículos, por segmentos	170

Figura 11-4.	Dimensiones de un vehículo tipo “micro”	171
Figura 11-5.	AASHTO Passenger car vehicle	172
Figura 11-6.	AASHTO Single-unit truck	173
Figura 11-7.	AASHTO WB-12 (WB-40)	173
Figura 11-8.	Esquema del significado de los términos “offtracking” y “swept path”	175
Figura 11-9.	Trayectoria del modelo WB-105 en el estudio de Fambro y otros	176
Figura 11-10.	Trazada de un camión girando. California DOT.	177
Figura 12-1.	Accidentes en EEUU en los últimos años	178
Figura 12-2.	Accidentes en España, en los últimos años	179
Figura 12-3.	Tasas de accidentes en diversos países desarrollados	179
Figura 12-4.	Tasas de accidentes en diversos países desarrollados (2)	180
Figura 12-5.	Estrategias a seguir según la Dirección General de Tráfico	181
Figura 12-6.	Factores concurrentes en los accidentes de circulación	183
Figura 12-7.	Accidentes en España, según características de la vía	186
Figura 12-8.	Proporción de accidentes producidos en intersecciones	186
Figura 12-9.	Accidentes en España, según el tipo de vehículo	188
Figura 12-10.	Accidentes según la hora, en España en 2003.	189
Figura 12-11.	Distribución de accidentes mortales en España según el tipo	190
Figura 12-12.	Accidentes de cambio de carril-incorporación respecto al total	191
Figura 12-13.	Tipos de accidentes en cambio de carril e incorporaciones	193
Figura 12-14.	Tipos de accidentes en cambio de carril e incorporaciones (continuación)	194
Figura 12-15.	Clases de accidentes LCM	195
Figura 12-16.	Distribución de accidentes durante cambios de carril según subclases	196
Figura 12-17.	Accidentes LCM según su luminosidad y tipo de vehículo	196
Figura 12-18.	Accidentes LCM por luminosidad y tipo de colisión	197
Figura 12-19.	Accidentes LCM por cercanía a una intersección y tipo de colisión	198
Figura 12-20.	Accidentes LCM por velocidad relativa	198
Figura 12-21.	Accidentes LCM por condiciones atmosféricas y tipo de vehículo	199
Figura 12-22.	Accidentes LCM por condiciones atmosféricas y tipo de colisión	199
Figura 12-23.	Accidentes tipo LCM según el pavimento y tipo de vehículo	200
Figura 12-24.	Accidentes LCM según el pavimento y tipo de colisión	200
Figura 12-25.	Accidentes LCM y trazado en alzado	201
Figura 12-26.	Accidentes LCM y trazado en planta	202
Figura 12-27.	Accidentes LCM por cada 100 millones de millas-veh, por tipo de vehículo	202
Figura 12-28.	Porcentaje de conductores que no vieron al vehículo opuesto	203
Figura 12-29.	Causas de accidentes LCM, según US DOT (1995)	204
Figura 12-30.	Datos de accidentes recogidos en California	209

Figura 12-31.	Factor de amplificación de accidentalidad, para intersección de 4 ramales.	214
Figura 13-1.	Visión de una señal por un conductor sano	223
Figura 13-2.	Visión de una señal por un conductor que sufre cataratas	223
Figura 13-3.	Distancia anual media recorrida, según la edad	226
Figura 13-4.	Permiso de conducción por edades, en España	227
Figura 13-5.	Tasas de alcoholemia en conductores que sufrieron un accidente, según la edad, en EEUU	228
Figura 13-6.	Accidentes por exceso de velocidad, según edad del conductor	228
Figura 13-7.	Heridos en accidentes de tráfico, según la edad	229
Figura 13-8.	Víctimas mortales en accidentes de tráfico, según la edad	230
Figura 13-9.	Índice de gravedad según la edad	230
Figura 13-10.	Tasas de accidentes según la edad	231
Figura 13-11.	Accidentes de personas mayores en intersecciones	231
Figura 14-1.	Esquema del proceso de percepción-reacción	236
Figura 14-2.	Esquema de un modelo de sistema dinámico	244
Figura 14-3.	Diagrama de flujo para la realización de una maniobra de cambio de carril	247
Figura 14-4.	Algoritmo de aceptación del hueco	248
Figura 14-5.	Influencia de la psicología en el proceso de aceptación de huecos	250
Figura 14-6.	División del carril de aceleración en segmentos	251
Figura 14-7.	Modelo para el cálculo del hueco crítico	252
Figura 14-8.	Huecos hacia delante y hacia atrás	253
Figura 14-9.	Distribución acumulada de huecos aceptados, medidos en tiempo para colisión	255
Figura 14-10.	Área de seguridad, mostrando los huecos hacia delante y hacia atrás, en tiempo para colisión, para diferentes percentiles.	256
Figura 14-11.	Ejemplo de cálculo del hueco crítico	258
Figura 14-12.	Ejemplo de gráfico para el cálculo del hueco crítico, según el método de Raff	258
Figura 14-13.	Trayectoria ideal durante la maniobra de cambio de carril	260
Figura 14-14.	Trayectoria en "S" formada por una función polinómica de 5º orden	261
Figura 14-15.	Variación de la orientación del vehículo, y actuación necesaria sobre el volante, para seguir la curva polinómica de 5º orden.	261
Figura 14-16.	Ejemplo de una curva logística	262
Figura 14-17.	Derivada de la función logística	262
Figura 15-1.	Perspectiva cónica	265
Figura 15-2.	Otros elementos de la perspectiva cónica	265
Figura 15-3.	Perspectiva cónica canónica	267
Figura 15-4.	La transformación inversa a la perspectiva tiene múltiples soluciones	273
Figura 15-5.	Perspectiva de un triángulo	275
Figura 15-6.	Abatimiento del plano horizontal sobre el plano de cuadro	275

Figura 15-7.	Abatimiento del vértice sobre el plano de cuadro	276
Figura 15-8.	Perspectiva cónica reducida a transformación plana	276
Figura 15-9.	Los puntos de fuga en una homología plana	277
Figura 15-10.	Transformación homológica de un cuadrilátero. Paso 1	280
Figura 15-11.	Transformación homológica de un cuadrilátero. Paso 2	281
Figura 15-12.	Transformación homológica de un cuadrilátero. Paso 3	281
Figura 15-13.	Transformación homológica de un cuadrilátero. Paso 4	282
Figura 15-14.	Ejemplo de rectángulo de referencia	282
Figura 15-15.	Doble homología. Paso 1	284
Figura 15-16.	Doble homología. Paso 2	284
Figura 15-17.	Doble homología. Paso 3	285
Figura 15-18.	Ejemplo de cálculo de un punto	286
Figura 15-19.	Caso particular del rectángulo	287
Figura 16-1.	Visión general de un puente y la cámara situada al lado	303
Figura 16-2.	Detalle de la cámara en lo alto del poste	303
Figura 16-3.	Cámara sobre trípode, semioculta tras la barrera	305
Figura 16-4.	Cámara en la acera de un puente, dirigida hacia la parte inferior	306
Figura 16-5.	Midiendo el ángulo cubierto por el retrovisor izquierdo	308
Figura 16-6.	Esquema explicativo del tipo de maniobra centrada	318
Figura 16-7.	Esquema explicativo del tipo de maniobra tangente	318
Figura 16-8.	Esquema explicativo del tipo de maniobra secante	318
Figura 16-9.	Esquema explicativo del tipo de maniobra abierta	319
Figura 16-10.	Esquema explicativo del tipo de maniobra mixta	319
Figura 17-1.	Cámara de la DGT vista desde otra cámara próxima	324
Figura 17-2.	Ejemplo de encuadre para grabar la trayectoria de incorporación	325
Figura 17-3.	Cámara portátil situada sobre trípode	327
Figura 17-4.	Encuadre demasiado amplio	328
Figura 17-5.	Encuadre muy reducido	329
Figura 17-6.	Imagen obtenida por una cámara semioculta	329
Figura 17-7.	Imagen desde el punto de vista del conductor. La cámara pasa desapercibida.	330
Figura 17-8.	Ampliación de imagen mostrando dónde está oculta la cámara	330
Figura 17-9.	Operario actuando sobre la cámara	331
Figura 17-10.	Imagen tomada a medio día	331
Figura 17-11.	Imagen tomada al atardecer	332
Figura 17-12.	El sol refleja en el cristal delantero	332
Figura 17-13.	El sol deslumbra la imagen	333
Figura 17-14.	A contraluz no se distingue nada	333
Figura 17-15.	Utilización de viseras	334
Figura 17-16.	El sol entra en el interior del vehículo	334
Figura 17-17.	Ubicación de la cámara en la posición 1.	335
Figura 17-18.	Imágenes tomadas en posición 1	335
Figura 17-19.	Ubicación de la cámara en la posición 2.	336
Figura 17-20.	Imagen tomada desde la posición 2	336
Figura 17-21.	La caja trasera impide la visión desde la posición 2	336

Figura 17-22. Ubicación de la cámara en la posición 3 337
Figura 17-23. Imágenes tomadas desde la posición 3 337
Figura 17-24. Otros vehículos pueden obstaculizar la visión 337
Figura 17-25. Ubicación de la cámara en la posición 4 338
Figura 17-26. Ejemplos de imágenes tomadas en posición 4 338
Figura 17-27. Ubicación de la cámara en la posición 5 339
Figura 17-28. Ejemplos de imágenes tomadas en posición 5 339
Figura 17-29. Esquema con la colocación de 2 cámaras en la zona 5 340
Figura 17-30. Esquema con la colocación de una cámara en la zona 4 y otra en la zona 5 341
Figura 17-31. Esquema del método de triangulación 344
Figura 17-32. Error del método de triangulación 345
Figura 17-33. Triángulos concatenados 345
Figura 17-34. Acumulación de errores 346
Figura 17-35. Mediciones adicionales 346
Figura 18-1. Esquema de los diferentes ángulos que hay en una incorporación 367
Figura 18-2. Cámara utilizada y tipo de prioridad 375
Figura 18-3. Distribución según el ángulo de incorporación 375
Figura 18-4. Distribución según la anchura del carril de incorporación 376
Figura 18-5. Distribución según el ancho del arcén del carril de incorporación 376
Figura 18-6. Distribución según el número de carril de la vía principal 377
Figura 18-7. Distribución según la posición de la línea de fin de carril 377
Figura 18-8. Distribución según el tipo de vehículo de incorporación 378
Figura 18-9. Distribución según el tipo de vehículo principal 378
Figura 18-10. Proporción de maniobras condicionadas 379
Figura 18-11. Posición utilizada para esperar el hueco 379
Figura 18-12. Proporción de conductores que detiene su vehículo 380
Figura 18-13. Invasión del arcén por los conductores que intentaron la maniobra 380
Figura 18-14. Distribución según el ángulo de reorientación 381
Figura 18-15. Diagrama de dispersión para Reorientación y Ángulo de reorientación 381
Figura 18-16. Diagrama "caja-bigote" para Reorientación y Ángulo de reorientación 382
Figura 18-17. Ángulo del ramal de incorporación y reorientación 382
Figura 18-18. Ángulo del ramal de incorporación y Ángulo de reorientación 383
Figura 18-19. Anchura del arcén del ramal de incorporación y reorientación del vehículo que se incorpora 383
Figura 18-20. Anchura del ramal de incorporación y ángulo de reorientación 384
Figura 18-21. Tipo de vehículo que se incorpora y reorientación adoptada 384
Figura 18-22. Reorientación adoptada según el tipo de vehículo 385
Figura 18-23. Condicionamiento en el ángulo de reorientación adoptado 385
Figura 18-24. Condicionamiento en la reorientación adoptada 386

Figura 18-25. Relación lineal entre la reorientación de un vehículo y la de su precedente 386
Figura 18-26. Reorientación según la velocidad mínima del que se incorpora 387
Figura 18-27. Reorientación según la posición de espera adoptada 387
Figura 18-28. Distribución del tiempo utilizado en la maniobra 388
Figura 18-29. Tiempo de maniobra y velocidad de inicial de aproximación 388
Figura 18-30. Tiempo de maniobra y aceleración máxima adoptada 389
Figura 18-31. Tiempo de maniobra y tipo de vehículo 389
Figura 18-32. Reorientación y tiempo utilizado en la maniobra 390
Figura 18-33. Ángulo de reorientación y tiempo utilizado en la incorporación 391
Figura 18-34. Diagrama "caja-bigote" de los huecos aceptados y rechazados 391
Figura 18-35. Diagrama de dispersión de huecos aceptados y rechazados 392
Figura 18-36. Proporción de huecos rechazados y aceptados en función de la magnitud en segundos 393
Figura 18-37. Método de Raff de cálculo del hueco crítico 393
Figura 18-38. Hueco crítico cuando el vehículo con preferencia es un turismo 394
Figura 18-39. Hueco crítico cuando el vehículo con preferencia es un camión 394
Figura 18-40. Maniobras conflictivas por huecos aceptados erróneamente 395
Figura 18-41. Impaciencia del conductor al evaluar el hueco 396
Figura 18-42. Relación entre la prontitud en terminar la maniobra y el tamaño reducido del hueco, para vehículos que no pararon 396
Figura 18-43. Relación entre la prontitud en terminar la maniobra y el tamaño reducido del hueco, para vehículos que sí pararon 397
Figura 18-44. Velocidad mínima en la maniobra de incorporación y hueco aceptado 397
Figura 18-45. Huecos rechazados y velocidad mínima de la maniobra 398
Figura 19-1. Ventana de inicio de instalación 401
Figura 19-2. Elección del directorio de instalación 401
Figura 19-3. Elección del nombre del grupo de programas 402
Figura 19-4. Copia de los archivos 402
Figura 19-5. Mensaje final 403
Figura 19-6. Ventana del programa, al iniciar 403
Figura 19-7. Menú ayuda 404
Figura 19-8. Cuadro de diálogo "Acerca de…" 405
Figura 19-9. Imagen típica del programa en funcionamiento 406
Figura 19-10. Barra de controles de video 407
Figura 19-11. Barra de controles de visualización 408
Figura 19-12. Menú "Ver" 408
Figura 19-13. El programa puede trabajar con 2 o más capturas a la vez 409
Figura 19-14. Controles para la definición de referencias 411
Figura 19-15. Menú contextual de captura 411
Figura 19-16. Menú "Referencias" 412

Figura 19-17. Los botones del asistente aparecen junto a los controles de referencias 412
Figura 19-18. Grupo de controles para los cálculos 413
Figura 19-19. Menú "Cálculos" 413
Figura 19-20. Menú "Edición" 415
Figura 19-21. Ejemplo de localización de referencias 416
Figura 19-22. Diferente precisión en función de la dirección de medida 417
Figura 19-23. Una de las primeras iteraciones de cálculo 418
Figura 19-24. Iteración intermedia 418
Figura 19-25. Resultado final 419
Figura 19-26. Ejemplo de cálculo con mucha más precisión 419
Figura 19-27. Formulario de opciones del programa 421
Figura 19-28. Referencias tomadas 422
Figura 19-29. Líneas obtenidas por restitución, superpuestas a la foto aérea 422
Figura 19-30. Referencias tomadas 423
Figura 19-31. Líneas obtenidas por restitución superpuestas a la foto aérea 423
Figura 19-32. Referencias tomadas 424
Figura 19-33. Líneas obtenidas por restitución superpuestas a la foto aérea 424
Figura 19-34. Referencias tomadas 425
Figura 19-35. Líneas obtenidas por restitución superpuestas a la foto aérea 425
Figura 20-1. Foto aérea de la intersección CV50002 430
Figura 20-2. Foto aérea de la intersección A706 430
Figura 20-3. Foto aérea de la intersección A301 431
Figura 20-4. Foto aérea de la intersección CV3504 431
Figura 20-5. Parámetros geométricos de una incorporación 432
Figura 21-1. Número de maniobras analizadas en cada ubicación 435
Figura 21-2. Distribución según el tipo de maniobra 435
Figura 21-3. Tipos de maniobras observadas 436
Figura 21-4. Ángulo del vehículo en el momento de la decisión 436
Figura 21-5. Ángulo en el momento de incorporación (invasión del carril principal) 437
Figura 21-6. Campo visual usado para tomar la decisión de incorporarse 437
Figura 21-7. Edad del conductor, por categorías 438
Figura 21-8. Rango de edad observado en los conductores 438
Figura 21-9. Sexo del conductor 438
Figura 21-10. Vehículos que tuvieron que parar y esperar a un hueco 439
Figura 21-11. Tiempo pasado esperando un hueco adecuado 439
Figura 21-12. Número de vehículos que rebasaron al que esperaba 440
Figura 21-13. Porcentaje de vehículos que realizaron la maniobra siguiendo a otro 440
Figura 21-14. Maniobras, por tipo de vehículo que las realiza 441
Figura 21-15. Hueco aceptado, en segundos 441
Figura 21-16. Intensidad instantánea, en la vía principal, en vehículos/hora 442

Figura 21-17. Porcentaje de maniobras conflictivas 443
Figura 21-18. Hueco medio rechazado en cada maniobra, en segundos 443
Figura 21-19. Ángulo de decisión, en grados sexagesimales 447
Figura 21-20. Proporción de uso del retrovisor, en función del ángulo 448
Figura 21-21. Comparación de regresiones 448
Figura 21-22. Método alternativo para el cálculo del ángulo crítico 449
Figura 21-23. Ángulo incorporación, en grados sexagesimales 450
Figura 21-24. Método alternativo para el cálculo del ángulo crítico 451
Figura 21-25. Relación entre el uso del retrovisor y el tipo de maniobra 451
Figura 21-26. Modelo "probit" de regresión entre el uso del retrovisor y el tipo de trayectoria 452
Figura 21-27. Relación entre el ancho de carril y el uso del retrovisor 453
Figura 21-28. Datos recogidos que relacionan el uso del retrovisor con el ancho del arcén 453
Figura 21-29. Relación entre el ancho de arcén y el uso del retrovisor 454
Figura 21-30. Frecuencia de uso del retrovisor, por edades 454
Figura 21-31. Fracción de uso del retrovisor, en función de la edad del conductor 455
Figura 21-32. Datos experimentales entre tipo de vehículo y uso del retrovisor 456
Figura 21-33. Relación entre el tipo de vehículo y el uso del retrovisor 456
Figura 21-34. Relación entre el uso del retrovisor y el largo del vehículo (m) 456
Figura 21-35. Ausencia de diferencias significativas entre sexos 457
Figura 21-36. Familias de trayectorias observadas en la A301 459
Figura 21-37. Familias de trayectorias observadas en la CV50002 460
Figura 21-38. Familias de trayectorias observadas en la CV3504 461
Figura 21-39. Familias de trayectorias observadas en la A706 462
Figura 21-40. Ángulo respecto al carril principal, en función del tipo de trayectoria 463
Figura 21-41. Ángulo respecto al carril principal, en función del tipo de trayectoria 463
Figura 21-42. Trayectorias observadas en la CV3504, según el uso del retrovisor 464
Figura 21-43. Trayectorias observadas en la CV50002, según el uso del retrovisor 465
Figura 21-44. Trayectorias observadas en la A706, según el uso del retrovisor 466
Figura 21-45. Trayectorias observadas en la A301, según el uso del retrovisor 467
Figura 21-46. Frecuencia de aparición de las maniobras, según la ubicación 469
Figura 21-47. Valor medio del ángulo, para cada ubicación estudiada 469
Figura 21-48. Relación entre el ángulo de la trayectoria y el ángulo de la cuña 470
Figura 21-49. Relación entre la trayectoria y el trazado del carril 471
Figura 21-50. Reorientación en función del tipo de trayectoria 471
Figura 21-51. Reorientación para diferentes tipos de trayectorias 473

Figura 21-52. Relación entre ancho de carril y reorientación en el punto de decisión 473
Figura 21-53. Relación entre ancho de carril y reorientación en el punto de incorporación 474
Figura 21-54. Trayectorias escogidas por los conductores, en función del ancho del arcén (m) 474
Figura 21-55. Relación lineal entre el ángulo de reorientación y el ancho del arcén 475
Figura 21-56. Reorientación en función del ancho de carril y arcén 476
Figura 21-57. Maniobra adoptada, en función del tipo de vehículo 477
Figura 21-58. Relación entre el tipo de vehículo y la trayectoria 478
Figura 21-59. Relación entre la edad y la trayectoria adoptada 479
Figura 21-60. Condicionamiento de la maniobra por el vehículo precedente (1) 479
Figura 21-61. Condicionamiento de la maniobra por el vehículo precedente (2) 480
Figura 21-62. Coeficientes de autocorrelación calculados, y límites de normalidad 480
Figura 21-63. Coeficientes de autocorrelación calculados, y límites de normalidad 481
Figura 21-64. Relación ausente entre la intensidad y la trayectoria del vehículo 482
Figura 21-65. Relación entre el sexo y el tipo de trayectorias escogidas 483
Figura 21-66. Ausencia de relación entre el sexo y la trayectoria 484
Figura 21-67. Tipo de trayectoria en función de la reorientación 485
Figura 21-68. Relación entre el ángulo de incorporación y el tipo de trayectoria 486
Figura 21-69. Gráfico caja-bigote múltiple, del ancho respecto al tipo de vehículo 487
Figura 21-70. Ancho del vehículo en metros 487
Figura 21-71. Gráfico caja-bigote múltiple, del largo respecto al tipo de vehículo 488
Figura 21-72. Largo (distancia entre ejes) del vehículo, en metros 488
Figura 21-73. Intensidad media en la vía principal, por ubicaciones 489
Figura 21-74. Fracción de maniobras condicionadas, por ubicaciones 489
Figura 21-75. Relación entre la intensidad y los huecos en el tráfico 490
Figura 21-76. Intensidad instantánea de la vía principal 492
Figura 21-77. Relación entre la intensidad y la aparición de conflictos 492
Figura 21-78. Relación entre intensidad y conflictividad de las maniobras 492
Figura 21-79. Relación entre hueco aceptado y conflictividad 493
Figura 21-80. Función de distribución acumulada, de las maniobras conflictivas 493
Figura 21-81. Modelo PROBIT para “conflictiva” en función del “hueco aceptado” 494
Figura 21-82. Modelo PROBIT propuesto para conflictividad en función del “tiempo de espera” 494
Figura 21-83. Modelo PROBIT propuesto para conflictividad en función del “nº de vehículos en espera” 495

Figura 21-84. Datos disponibles que relacionan la trayectoria con la conflictividad 495
Figura 21-85. Modelo PROBIT propuesto para la variable "conflictiva" y "trayectoria tipoN" 496
Figura 21-86. Modelo PROBIT propuesto para la variable "conflictiva" y "reorientación decisión" 496
Figura 21-87. Ausencia de relación entre el sexo y la conflictividad 497
Figura 21-88. Ausencia de relación entre la edad y la conflictividad 497
Figura 21-89. Ausencia de relación entre el tipo de vehículo y la conflictividad 497
Figura 22-1. Diagrama de flujo para el conductor que realiza una incorporación 502
Figura 22-2. Diagrama de flujo para fase inicial de la maniobra de incorporación 507
Figura 22-3. Diagrama de flujo para la maniobra de incorporación 508
Figura 22-4. Esquema de relaciones estudiadas 509
Figura 23-1. Ventana de inicio de instalación 512
Figura 23-2. Elección del directorio de instalación 513
Figura 23-3. Elección del nombre del grupo de programas 513
Figura 23-4. Copia de los archivos 514
Figura 23-5. Mensaje final 514
Figura 23-6. Imagen del programa en funcionamiento 515
Figura 23-7. Menú ayuda 516
Figura 23-8. Cuadro de diálogo "Acerca de…" 516
Figura 23-9. Área para introducir datos de geometría 517
Figura 23-10. Menú desplegable para elegir la línea activa 519
Figura 23-11. Ejemplo de destino marcando el límite del área a estudiar 520
Figura 23-12. Controles necesarios para una bifurcación 521
Figura 23-13. Ejemplo de bifurcación 521
Figura 23-14. Datos necesarios para definir un cruce 522
Figura 23-15. Ejemplo de cruce con stop 523
Figura 23-16. Introduciendo los datos de una línea de stop 523
Figura 23-17. Datos necesarios para definir un puente 524
Figura 23-18. Datos necesarios para un obstáculo 525
Figura 23-19. Obstáculo sobre la calzada 525
Figura 23-20. Señal de limitación de velocidad 526
Figura 23-21. Ejemplo de señal 526
Figura 23-22. Ejemplo de obstrucción visual debido a edificios cercanos 527
Figura 23-23. Grupo de controles para definir los vehículos 528
Figura 23-24. Controles de visualización 530
Figura 23-25. Menú "Ver" 530
Figura 23-26. Controles de cálculo 531
Figura 23-27. Contenido del menú "Cálculos" 532
Figura 23-28. Ventana de opciones 533
Figura 23-29. Esquema para el cálculo de la velocidad transversal 534
Figura 23-30. Esquema para el cálculo de giros 535
Figura 24-1. Distancia de visibilidad en incorporaciones por la derecha 541
Figura 24-2. Distancia de visibilidad en incorporaciones por la izquierda 542

Figura 24-3.	Distancia de visibilidad directa en incorporaciones por la derecha	543
Figura 24-4.	Distancia de visibilidad directa en incorporaciones por la izquierda	544
Figura 24-5.	Cuña de 11º analizada con ValSIM (1)	546
Figura 24-6.	Cuña de 11º analizada con ValSIM (2)	546
Figura 24-7.	Cuña de 11º analizada con ValSIM (3)	546
Figura 24-8.	Cuña de -8º analizada con ValSIM (1)	547
Figura 24-9.	Cuña de -8º analizada con ValSIM (2)	548
Figura 24-10.	Cuña de -8º analizada con ValSIM (3)	548
Figura 24-11.	Cuña de 68º analizada con ValSIM (1)	549
Figura 24-12.	Cuña de 68º analizada con ValSIM (2)	549
Figura 24-13.	Cuña de 68º analizada con ValSIM (3)	549
Figura 24-14.	Cuña de -75º analizada con ValSIM	550
Figura 24-15.	Cuña de -70º analizada con ValSIM	550
Figura 24-16.	Incorporación oblicua existente	552
Figura 24-17.	Incorporación oblicua modificada con cuña de 11º	552
Figura 24-18.	Incorporación oblicua modificada con ángulo de 70º	552
Figura 25-1.	Puntos de estudio	556
Figura 25-2.	Situación actual del punto 1	565
Figura 25-3.	Solución de proyecto para el punto 1	565
Figura 25-4.	Vehículo articulado en la solución propuesta para el punto 1	566
Figura 25-5.	Situación actual del punto 2	566
Figura 25-6.	Alternativa planteada para el punto 2	567
Figura 25-7.	Solución de proyecto para el punto 2	567
Figura 25-8.	Camión circulando por la solución propuesta para el punto 2	568
Figura 25-9.	Situación actual para el punto 3	569
Figura 25-10.	Situación actual para el punto 4 (1)	569
Figura 25-11.	Situación actual para el punto 4 (2)	570
Figura 25-12.	Situación actual del punto 5	570
Figura 25-13.	Situación actual del punto 6	571
Figura 25-14.	Solución de proyecto para el punto 6 (turismo)	571
Figura 25-15.	Solución de proyecto para el punto 6 (vehículo articulado)	571
Figura 25-16.	Situación actual del punto 7	572
Figura 25-17.	Solución no válida para el punto 7	572
Figura 25-18.	Alternativa 1 planteada para el punto 7	573
Figura 25-19.	Solución de proyecto para el punto 7 (turismo)	573
Figura 25-20.	Solución de proyecto para el punto 7 (autobús)	574
Figura 25-21.	Autobús incorporándose en el punto 7 (solución de proyecto)	574
Figura 25-22.	Alternativa 3 para el punto 7 (modificando el orden de preferencia)	575
Figura 25-23.	Alternativa 4 para el punto 7 (modificando el orden de preferencia)	575
Figura 25-24.	Ficha de la base de replanteo BR-5011	578
Figura 25-25.	Ficha de la base de replanteo BR-5012	579

Figura 25-26.	Ficha de la base de replanteo BR-5013	580
Figura 25-27.	Ficha de la base de replanteo BR-5014	581
Figura 25-28.	Esquema de explanada tipo E3 propuesta	582
Figura 25-29.	Esquema del paquete de firmes propuesto	583
Figura 28-1.	El vehículo con preferencia queda fuera del campo visual del conductor en una incorporación oblicua	640
Figura 28-2.	Vistas superior e inferior extraídas de las grabaciones realizadas	641

Índice de tablas

Tabla 5-1.	Acuerdos circulares propuestos por el MOP (1968)	49
Tabla 5-2.	Acuerdos circulares con isleta propuestos por el MOP (1968)	51
Tabla 5-3.	Valores para el diseño de intersecciones no canalizadas, según la AASHTO	54
Tabla 5-4.	Valores para el diseño de intersecciones canalizadas, según la AASHTO	56
Tabla 6-1.	Conductores que intentaron realizar un giro a derechas con el semáforo en rojo.	66
Tabla 6-2.	Conductores que no necesitaron mirar sus retrovisores al realizar un giro a derechas con el semáforo en rojo.	67
Tabla 6-3.	Conductores que realizaron el giro a derechas con el semáforo en rojo del total que tuvieron la oportunidad.	68
Tabla 6-4.	Porcentaje de conductores que realizaron el giro a derechas con el semáforo en rojo sin detenerse completamente.	69
Tabla 8-1.	Duración y frecuencia de aparición de miradas durante un cambio de carril	86
Tabla 9-1.	Ángulos de visión obtenidos por cada uno de los retrovisores, en diferentes posiciones	117
Tabla 9-2.	Análisis ANOVA del ángulo de visión respecto al tipo de vehículo	118
Tabla 9-3.	Análisis ANOVA del ángulo de visión respecto al sexo	119
Tabla 9-4.	Análisis ANOVA del modelo de regresión entre ángulo de visión y edad del conductor	121
Tabla 9-5.	Parámetros del modelo de regresión entre ángulo de visión y edad del conductor	121
Tabla 9-6.	Análisis ANOVA entre el ángulo de visión y la postura del conductor	122
Tabla 9-7.	Análisis ANOVA entre el ángulo de visión y postura atrasada	122
Tabla 9-8.	Análisis ANOVA entre ángulo de visión y convexidad del espejo	123
Tabla 9-9.	Valores para el diseño, del ángulo de visión por los retrovisores	125
Tabla 9-10.	Valores del ángulo de visión por los retrovisores para el modelo explicativo	126
Tabla 9-11.	Valores de diseño para el ángulo de visión lateral a la derecha	129
Tabla 9-12.	Valores de diseño del campo visual hacia la derecha	132
Tabla 10-1.	Coste de cada accidente, en función de la gravedad del mismo	160
Tabla 11-1.	Dimensiones (en cm) medias ponderadas de los vehículos, por segmentos	170

Tabla 11-2.	Dimensiones (en cm) media ponderada de los vehículos, global	170
Tabla 11-3.	Dimensiones de los vehículos tipo propuestas por la AASHTO	174
Tabla 12-1.	Accidentes en España, según el tipo de vía	185
Tabla 12-2.	Accidentes en España, según el tipo de vehículo	188
Tabla 12-3.	Distribución de accidentes mortales en España según el tipo	190
Tabla 12-4.	Accidentes mortales en España, según la causa principal	191
Tabla 12-5.	Factores causantes del accidente	192
Tabla 12-6.	Número de accidentes y oblicuidad, en intersecciones de tres brazos	215
Tabla 12-7.	Número de accidentes y oblicuidad, en intersecciones de cuatro brazos	215
Tabla 12-8.	Reducción en los accidentes tras instalar carriles de giro a izquierda	217
Tabla 12-9.	Reducción en los accidentes tras instalar carriles de giro a derecha	217
Tabla 12-10.	Canalización y accidentes, intersecciones en "T"	217
Tabla 12-11.	Canalización e accidentes, intersecciones de "+"	218
Tabla 13-1.	Giro de cuello en función de la edad	224
Tabla 14-1.	Tiempo de percepción-reacción obtenido experimentalmente	239
Tabla 14-2.	Resumen de los modelos de circulación condicionada. Fuente: Mehmood (2003).	243
Tabla 14-3.	Hueco crítico según agresividad del conductor y posición en el carril de aceleración	251
Tabla 14-4.	Valores propuestos para el cálculo de visibilidades en intersecciones	257
Tabla 17-1.	Resumen de las ubicaciones escogidas	362
Tabla 18-1.	Campaña de grabaciones preliminares	365
Tabla 20-1.	Grabaciones realizadas	429
Tabla 20-2.	Tabla resumen de las ubicaciones estudiadas	432
Tabla 21-1.	Tabla de resultados del análisis PROBIT	445
Tabla 21-2.	Tabla ANOVA del modelo para la variable "mirada decisión"	446
Tabla 21-3.	Tabla ANOVA sobre la bondad del ajuste para "ángulo decisión"	449
Tabla 21-4.	Tabla ANOVA sobre bondad del ajuste para "ángulo incorporación"	450
Tabla 21-5.	Tabla ANOVA de "trayectoria tipo" sobre "mirada decisión"	451
Tabla 21-6.	Tabla ANOVA múltiple para "Trayectoria tipo"	468
Tabla 21-7.	Tabla ANOVA múltiple para "Ángulo decisión"	468
Tabla 21-8.	Tabla ANOVA para la variable "reorientación decisión"	472
Tabla 21-9.	Tabla ANOVA para la variable "reorientación incorporación"	472
Tabla 21-10.	Tabla ANOVA entre "Trayectoria tipo" y "Vehículo pesado"	477

Tabla 21-11.	Tabla ANOVA entre las variables "Reorientación decisión" y "Vehículo tipo"	477
Tabla 21-12.	Tabla resultados ANOVA entre "trayectoria tipo" y "sexo del conductor"	483
Tabla 21-13.	Tabla ANOVA entre el "sexo del conductor" y la "reorientación en la decisión"	483
Tabla 21-14.	Tabla ANOVA entre el ancho del vehículo y el tipo de vehículo	486
Tabla 21-15.	Tabla ANOVA de largo frente a tipo de vehículo	488
Tabla 21-16.	Análisis PROBIT de la variable "conflictividad"	491
Tabla 25-1.	Coordenadas de la red básica	577
Tabla 25-2.	Listado de puntos singulares (eje del punto 1)	584
Tabla 25-3.	Replanteo de la línea de arcén derecho (punto 1)	584
Tabla 25-4.	Listado de puntos singulares (eje del punto 2)	585
Tabla 25-5.	Replanteo de la línea de arcén izquierdo (punto 2)	585
Tabla 25-6.	Replanteo de la línea de arcén derecho (punto 2)	586
Tabla 25-7.	Listado de puntos singulares (eje del punto 4)	586
Tabla 25-8.	Replanteo de la línea de arcén izquierdo (punto 4)	588
Tabla 25-9.	Replanteo de la línea de arcén derecho (punto 4)	589
Tabla 25-10.	Listado de puntos singulares (eje del punto 6)	589
Tabla 25-11.	Replanteo de la línea de arcén izquierdo (punto 6)	590
Tabla 25-12.	Replanteo de la línea de arcén derecho (punto 6)	590
Tabla 25-13.	Replanteo de la línea de arcén izquierdo (punto 7)	591
Tabla 25-14.	Replanteo de la línea de arcén derecho (punto 7)	591
Tabla A1-1.	Datos del estudio preliminar (1)	671
Tabla A1-2.	Datos del estudio preliminar (2)	680
Tabla A1-3.	Datos del estudio preliminar (3)	689
Tabla A1-4.	Datos del estudio preliminar (4)	698
Tabla A1-5.	Datos del estudio preliminar (5)	707
Tabla A1-6.	Datos experimentales (1)	712
Tabla A1-7.	Datos experimentales (2)	717
Tabla A1-8.	Datos experimentales (3)	722
Tabla A1-9.	Datos experimentales (4)	726

1ª PARTE
INTRODUCCIÓN

1 Antecedentes

El presente documento constituye el **Proyecto Fin de Carrera** del alumno Javier Contreras Bueno para la obtención del título de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. El **profesor tutor** del mismo es D. Alfredo García García, catedrático de la Unidad de Caminos del Departamento de Transportes de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

El título del documento es: "Estudio experimental sobre maniobras de incorporación en disposiciones oblicuas. Aplicación práctica para la mejora del enlace de la CV-35 con la CV-336, en San Antonio de Benagéber (Valencia)." Este título fue aprobado por la Junta Permanente del Centro con anterioridad.

Este documento se acoge a la **normativa oficial de Proyectos Fin de Carrera**, aplicable en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPV, aprobada por la Junta de Escuela el 8 de julio de 2004.

Tal y como se explicita en el título, se trata de un "estudio experimental", por lo que, según la citada normativa, se trata de un **Proyecto Tipo II**: trabajos o estudios dentro del ámbito profesional de la titulación a la que opta el alumno.

La titulación a la que opta el alumno está reglada según el **Plan de Estudios** aprobado por la Universidad Politécnica de Valencia el 7 de mayo de 1997 y publicado en el Boletín Oficial del Estado con fecha 21 de mayo de 1997.

Este trabajo se enmarca en una **línea de investigación**, dirigida durante varios años por D. Alfredo García García, que trata sobre la visibilidad del conductor, su importancia en la seguridad vial, y su implicación en el diseño de carreteras. Otros trabajos anteriores de esta misma línea de investigación han sido: "Estudio de los factores que afectan a la visibilidad de los conductores" (Valerio Ortega Rosillo, 1999), "Carriles de aceleración" (Luis Neira Tovar, 1999) y "Estudio de visibilidad en incorporaciones oblicuas" (José Ramón González Ruiz, 2002).

El presente trabajo de investigación ha recibido **la concesión de una beca** por parte del Ministerio de Educación y Ciencia, dentro del programa anual de becas que esta entidad proporciona a alumnos de últimos años de carrera para que colaboren en proyectos de investigación desarrollados en departamentos de las diferentes universidades.

Se agradece la colaboración prestada por todos los miembros de la Unidad de Caminos del Departamento de Transportes de la UPV. En especial a Alfredo García García, Mario Alfonso Romero Rojas, Ludwing Felipe Libreros Céspedes, y Elías Medel Perallón, por su colaboración en la elaboración del presente estudio, tanto en su parte teórica como práctica.

También a los técnicos de la División de Carreteras de la Consellería de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes, por la aportación de la cartografía. Así mismo, hay que agradecer a los técnicos de la sala de gestión del tráfico de la DGT en Valencia la colaboración prestada, en especial al director D. Enrique Belda Esplugues, y al director de sala D. Julián Aragonés.

Por último, es de agradecer la comprensión y ayuda prestada por todos los amigos y familiares del autor del presente estudio, en especial, a Alejandro Pons Sánchez, Susana Escudero Navarro, Marcela Callejas Cadavid, y Luis Domingo García, por su especial colaboración en la toma de datos experimentales; y a Juan Miguel Contreras Rivas y Rosario Mª Sánchez-Aguilera Lapeña, por su ayuda en la revisión del documento.

Por último, realizada la revisión final de todo el proyecto por parte del tutor del mismo, se presenta en la secretaría de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPV, y **se eleva para su calificación por el Tribunal correspondiente, a la espera de su defensa pública el día fijado a dichos efectos**.

2 Objeto de estudio

2.1 Introducción

El objetivo de estas líneas es trazar unas directrices de actuación, un listado de actividades a realizar, una enumeración de metas deseables a alcanzar.

Lo primero es plantear qué se pretende conseguir con esta investigación. Se pretende hacer un estudio experimental de las circunstancias que rodean las maniobras en incorporaciones y cruces oblicuos, para extraer unos datos. Con éstos, se pretende plantear un modelo que permita comprender la realidad de estas maniobras. Finalmente, la meta es poder utilizar este modelo en la mejora de las incorporaciones y cruces existentes actualmente y en el diseño y comprobación de futuros proyectos de infraestructuras.

El trabajo se centrará en **cómo la oblicuidad influye en la seguridad de las intersecciones, a través de problemas en la visibilidad**.

2.2 El problema

El conductor en su vehículo va procesando la información que recibe de su entorno, y tomando las decisiones oportunas que le conducen a alcanzar su destino de una manera rápida, cómoda y segura. Esta información la recibe principalmente a través de la vista. Esto confiere al sentido de la visión una importancia capital en el proceso.

El conductor observa su entorno de varias maneras:

- hacia delante, a través del cristal delantero de su vehículo;
- hacia los lados, girando la cabeza y/o el torso, a través de los cristales laterales del vehículo;
- y hacia atrás, utilizando el espejo retrovisor central y los espejos retrovisores laterales.

No obstante, existen zonas denominadas "**ángulos muertos**" que quedan fuera del campo de visión del conductor. Se trata de dos regiones situadas a ambos lados del vehículo, y hacia atrás. Estas dos regiones aparecen dibujadas en morado y rayado en la Figura 2-1.

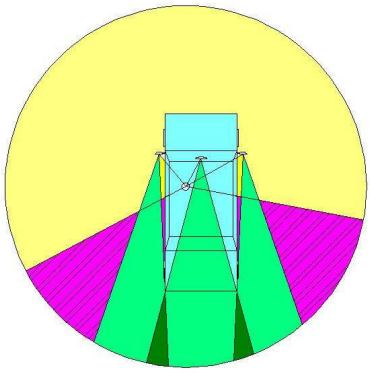


Figura 2-1. Campo visual del conductor.

El problema reside en que el conductor pierda información relevante debido a que no es capaz de percibir peligros en esas zonas. En concreto, en intersecciones y cruces oblicuos, existe la posibilidad de que el conductor no perciba a vehículos de la otra vía, según se muestra en la Figura 2-2 y la Figura 2-3.

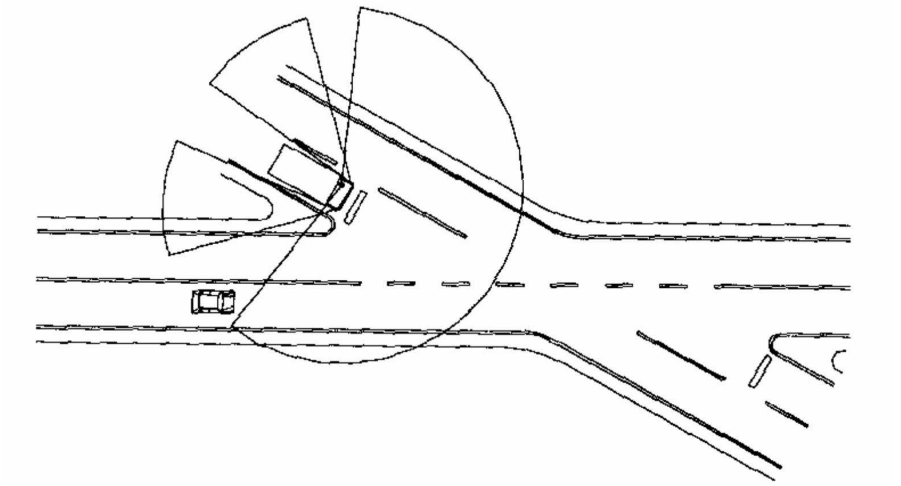


Figura 2-2. Problema en el ángulo muerto derecho

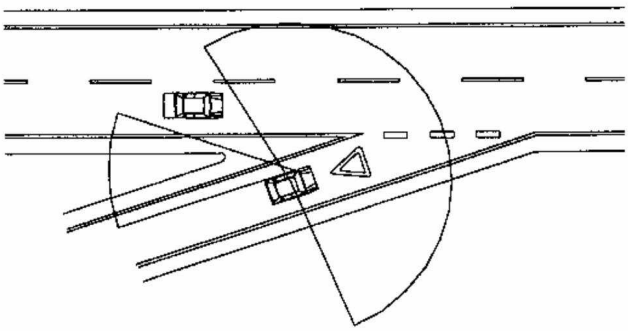


Figura 2-3. Problema en el ángulo muerto izquierdo

2.3 Contexto

Este estudio es continuación natural de otro realizado anteriormente en este mismo grupo de trabajo (González y García, 2002). En dicho trabajo, se realizó una recopilación de datos experimentales sobre los límites del campo de visión del conductor en su vehículo. Todas las mediciones se realizaron con vehículos parados y conductores voluntarios. Con estos datos se planteó un modelo pseudoestático para estudiar el fenómeno de la incorporación, y se llegó a conclusiones de índole práctica en el diseño de intersecciones.

Lo que se pretende ahora es completar los datos experimentales recogidos el año pasado, incluyendo parámetros dinámicos de las maniobras que tienen lugar en los cruces. Así se podrá confeccionar un modelo que dejará de ser pseudoestático para ser un **modelo dinámico**, más realista.

2.4 Elección del modelo

Una intersección es un fenómeno complejo, en el que entran en juego multitud de variables, y confeccionar un modelo para simular las intersecciones puede llegar a ser muy complicado, si queremos que sea realista. Pero las posibilidades de que se dispone son muy reducidas, por lo que se intentará simplificar todo lo posible.

Sin embargo, ahora se planteará un modelo completo, sin tomar en consideración si es abordable o no. Posteriormente se evaluará qué aspectos son menos esenciales y hasta qué punto el modelo puede simplificarse, sin que pierda demasiado ajuste con la realidad.

Por este motivo, se propone la confección de una herramienta de microsimulación. Esta herramienta consiste en un programa informático capaz de simular la circulación del tráfico sobre una determinada vía. Este tipo de programas, que se explicarán más adelante, permite tener en cuenta la distribución estadística de las diferentes variables, y realizar cálculos de tipo Monte-Carlo. Así mismo, también son las herramientas más adecuadas para evaluar el funcionamiento de un sistema dinámico, formado por elementos que se mueven en un entorno, siguiendo una serie de pautas de comportamiento, pero también con una cierta aleatoriedad.

De esta manera aprovechamos la enorme potencia de cálculo de las computadoras actuales, pero no dejamos al ingeniero ninguna herramienta para evaluar simplificadamente, a mano, la seguridad de una intersección.

Podemos modelar diferentes escenarios posibles, no sólo el caso característico. Por ejemplo: un turismo circulando a diversas velocidades; un camión y otros tipos de vehículos; un conductor normal, uno anciano, otro inexperto; condiciones de normales, o lluvia, niebla, noche… Para cada uno de ellos estimaremos su probabilidad de ocurrencia, evaluando la probabilidad de que coincidan diversos parámetros desfavorables.

El inconveniente es que requiere una gran cantidad de datos de entrada. Necesitamos no sólo el valor característico de cada parámetro, sino también su variabilidad estadística. En las situaciones límite, aquéllas que precisamente buscamos modelar, están asociadas a valores extremos de los parámetros. Se trata de las colas de las distribuciones, que precisamente es la parte más desconocida de la distribución. Se requiere una gran cantidad de datos experimentales para calibrar la forma de la función de distribución en sucesos con probabilidad de ocurrencia baja.

2.5 Variables a incluir en el modelo

A continuación se van a enumerar una gran lista de parámetros. Posteriormente, pueden descartarse algunos, si se detecta que su influencia no es significativa. Se define cada uno de ellos, se indica cómo influye en el modelo, cómo se relaciona con otros parámetros, y de dónde pueden obtenerse los datos requeridos.

2.5.1 Condiciones geométricas de la intersección.

Se trata de una familia de distancias y ángulos que puede ser bastante extensa. A esto hay que añadir la señalización de la misma. También abarca los acuerdos del trazado en planta y alzado que rodean la intersección, y otros datos geométricos.

En general, se trata de un dato de entrada del problema. Queremos que, dada una intersección en concreto, el modelo nos diga si está bien diseñada o no. El parámetro más importante de esta familia de datos, es el **ángulo de oblicuidad**. Evaluaremos diversas configuraciones de intersección, y variando el ángulo, podremos concluir qué ángulos son aceptables o cuáles no.

2.5.2 Características geométricas del vehículo

Las dimensiones de los vehículos turismo presentes en las carreteras nacionales ya fueron estudiadas en anteriores investigaciones. Sin embargo, puede hacerse una revisión de estos datos. Sería recomendable incluir las dimensiones de los vehículos pesados, que precisamente son los que más problemas presentan en las intersecciones e incorporaciones.

Tratar estas variables como variables aleatorias no parece razonable. Todas están íntimamente relacionadas entre sí. No hay ningún vehículo con la altura de un camión y la longitud de una moto. Por eso debería usarse una serie de vehículos tipo, que representaran al parque nacional. De esta manera la anchura del vehículo dejaría de ser una variable estadística del modelo para ser un dato de entrada, relacionado con el vehículo tipo de que se trate.

Como fuente pueden usarse datos extraídos de catálogos de los fabricantes, junto con estadísticas de matriculación a nivel nacional.

2.5.3 Campo de visión del conductor

Existe un campo de visión distinto para cada vehículo y para cada conductor. Se trata del dato clave de la investigación. Existen trabajos anteriores que ya incluyen estudios experimentales sobre esto, aunque pueden revisarse. Es importante estudiar los ángulos de visión de vehículos "con caja" (camiones, furgonetas, autobuses,…).

Como fuente de datos, debería hacerse un test rápido de la visibilidad del conductor dentro de su propio coche, similar a la campaña realizada por González Ruiz (2002), ponderando los resultados con estadísticas de los conductores con licencia en todo el territorio nacional.

2.5.4 Percepción del conductor

Este campo está muy poco estudiado, pues es muy complejo.

Es necesario establecer a dónde mira un conductor, cuánto tiempo permanece observando en esa dirección antes de cambiar su objetivo visual, cuánto tiempo necesita ver un peligro para percatarse de él, qué probabilidad hay de que detecte un peligro a través de un retrovisor cuando no está mirando directamente al retrovisor, cuánto tiempo necesita ver un vehículo para calcular la velocidad relativa de aproximación.

La percepción visual del conductor varía mucho con condiciones climáticas adversas. Se ve peor, pero también se conduce con más atención. El estado de concentración y alerta del conductor influye mucho en el patrón visual del sujeto.

La facilidad de percepción varía mucho según el tipo de objeto a percibir. Nos interesa, sobre todo, cómo se perciben otros vehículos en movimiento, pues son los objetos conflictivos con los que se enfrenta un conductor cuando llega a una intersección.

Para obtener estos datos, haría falta una serie de experimentos en simulador de conducción, realizados a una amplia gama de conductores, sometidos a diversas condiciones de conducción (simulada). También complementaría con grabaciones del rostro del conductor en situación real. Pondría una cámara en el vehículo del voluntario, que grabaría su forma de conducción en trayectos reales de todo tipo.

2.5.5 Rozamiento máximo

Tiene que ver con la distancia de parada de emergencia. No es un aspecto directamente tratado en este estudio, pero que sí influye directamente sobre los resultados del mismo.

Es necesario conocer cuál es el límite de frenada que es capaz de dar un conductor en situación de emergencia. Se trata del rozamiento entre rueda y pavimento en su valor residual, cuando la rueda se bloquea (a no ser que tenga ABS o similar).

Depende del neumático, del freno, del peso del vehículo, de las condiciones superficiales del pavimento, de la presencia de hielo o agua,…

2.5.6 Maniobras del conductor

Este apartado incluye conocer la forma patrón que tienen los distintos conductores de realizar las maniobras más comunes de la conducción. Por ejemplo: cambiar de carril, girar en una intersección, seguir recto, frenar ante un "stop", hacer una incorporación desde la izquierda, salir de un aparcamiento,...

Se trata de actividades rutinarias y mecánicas que cada conductor suele hacer siguiendo un patrón. Nos interesa conocer variables sobre su percepción como hacia qué sitios mira mientras realiza la maniobra, cada cuánto tiempo cambia de lugar de visión; pero también sobre la dinámica de la maniobra: el perfil de aceleraciones-velocidades usado, su posicionamiento en el carril,…

Son datos relativos al conductor y su forma de conducir, por lo que sólo dependen de éste: de su edad, experiencia al volante, cansancio, distracción.

Para conocer la forma de encarar estas maniobras se usarían cámaras de grabación enfocando al conductor mientras conduce normalmente, y también cámaras de grabación estáticas ayudadas por sensores de posición-velocidad, enfocando al vehículo para conocer la trayectoria seguida durante la maniobra.

2.5.7 Comportamiento del conductor

Éste es el punto más difícil del estudio. El factor humano aparece intrínseco en este apartado. Las personas son variables, aleatorias, no se rigen por esquemas rígidos. Sin embargo estamos tratando de programar una rutina en un ordenador, que simule esa aleatoriedad y algunas reglas básicas del sentido común.

Necesitamos conocer qué aspectos del entorno hacen que el conductor tome la decisión de realizar una maniobra o no, y de qué manera. Por ejemplo, cuál es el hueco, en el flujo de la vía principal, que acepta un conductor para hacer la maniobra de incorporación o cruce desde una vía secundaria. O, por ejemplo, cuál es la velocidad relativa entre el vehículo y un posible obstáculo, que hace que el conductor haga una maniobra evasiva (frenar, cambiar de carril). O bien, cuál es el cambio en el comportamiento del conductor, cuando las condiciones climatológicas son adversas. Están relacionadas todas ellas con la manera en que el sujeto percibe los riesgos que le rodean.

Estos datos son, sobre todo, **valores límite de determinadas variables que consiguen activar una decisión**, por ejemplo, que el conductor inicie una maniobra.

Si creamos un programa que simule el comportamiento de los conductores, debe incluir una serie de algoritmos que representen las decisiones que toma un conductor real frente a los estímulos que percibe. El programa representará bien a la realidad en la medida en que los conductores realicen la conducción de una manera más bien mecánica, rutinaria, rígida.

2.6 Esquema general del programa informático

En conclusión, este trabajo de investigación pretende desarrollar un programa informático que sea una **ayuda para el diseño de intersecciones y enlaces** de carretera. El programa facilita la aplicación práctica del modelo conceptual que se va a desarrollar y los datos experimentales recogidos que permiten calibrar dicho modelo.

Como **datos de entrada del programa**, hay que introducir las condiciones geométricas de la intersección: anchura y número de carriles, longitud del carril de aceleración/incorporación, el ángulo de la intersección, la curvatura en planta y alzado existente, la señalización vertical y horizontal, los obstáculos a la visibilidad, etc.

Otro grupo de datos de entrada se refiere a los vehículos implicados. El programa va simulando escenarios diferentes, en los cuales hay diversos vehículos, conducidos por sujetos dados, en una posición y velocidad dadas. Para ello se plantean dos estrategias alternativas. En la primera, los vehículos son dispuestos en una posición y con una velocidad inicial y evolucionan hasta salir de la intersección. En la segunda, se introducen en el programa unos patrones para la generación de vehículos en el sistema, que tratan de simular la llegada aleatoria de vehículos a la intersección.

También requiere como dato de entrada las funciones de probabilidad conocidas para las distintas variables que el modelo tiene en cuenta. Una función de generación aleatoria de números nos daría el valor requerido en cada caso. Estos datos de entrada son, en realidad, la calibración del modelo. Para conseguirlos hace falta una campaña de recogida experimental de datos.

Con estos datos, **el programa simula la circulación de los vehículos por el enlace de estudio**. Para ello calcula la posición de cada vehículo en cada instante de tiempo, por incrementos de tiempo relativamente cortos; calcularía el campo de visión de cada conductor; evaluaría, para cada conductor, los diferentes estímulos que recibe y el tiempo que tarda en procesarlos para tomar una decisión. Al cabo de un tiempo, el conductor estimulado toma la decisión y comienza una maniobra. En los instantes siguientes, el conductor va realizando la maniobra según el patrón correspondiente. Durante este lapso de tiempo, el conductor sigue atento a los estímulos, por si debe variar o reajustar su maniobra.

Tras simular un determinado intervalo de tiempo, los vehículos de la simulación salen del escenario, o bien sufren un accidente.

Como para llegar a alguna conclusión es necesario plantear muchos **escenarios** sobre la misma intersección (distintos vehículos, distintas condiciones iniciales), el programa debería ser capaz de ejecutar una lista de escenarios dada, guardando los resultados; o bien generar él mismo los diferentes escenarios mediante la rutina que simula la llegada aleatoria de vehículos a la intersección.

Así pues, dada una geometría y un tráfico, el programa genera una simulación de lo que ocurriría. Si se evalúan gran cantidad de escenarios, y un porcentaje elevado de ellos son accidentes, la intersección estará mal diseñada. De manera alternativa, si se simula un gran número de días de tráfico, y no ocurre ningún accidente, la intersección estará bien diseñada.

En un nivel superior, el usuario puede ir probando diversas configuraciones geométricas para obtener **conclusiones prácticas para el diseño**. Por ejemplo, relaciones entre el riesgo de accidentes, y la oblicuidad de la intersección.

3 Resumen de contenidos

En este apartado se plantea un resumen del documento completo, especificando en qué consiste cada uno de los siguientes apartados y justificando el orden seguido.

El **esquema general** del proyecto es el siguiente:

- Aspectos introductorios
- Estado del arte
- Diseño experimental
- Ejecución experimental y análisis de los resultados
- Aplicación práctica
- Anexos

Los primeros capítulos corresponden a **aspectos introductorios**, tales como el índice de contenidos, el índice de tablas y figuras, los antecedentes, el objetivo inicial del estudio y el presente resumen.

La parte del **estado del arte** es una revisión global de la bibliografía existente sobre el tema. Antes de iniciar cualquier investigación es muy importante recopilar cuáles han sido los avances que ya han realizado anteriores grupos de trabajo, para partir de esa base, y no desde cero. Esta revisión de trabajos anteriores también permite situar la presente investigación en su contexto.

Por otro lado, esta tarea es muy beneficiosa porque puede aportar ideas. Hay veces que, de un texto aparentemente sin mucha relación con la investigación, es posible obtener, por analogía, nuevas formas de trabajo, hipótesis, procedimientos experimentales, etc. Por ejemplo, la técnica de utilizar grabaciones de video de tráfico real en las intersecciones se ha utilizado con diferentes propósitos en múltiples investigaciones. Podemos obtener recomendaciones sobre cómo obtener grabaciones óptimas de tráfico de un texto cuyo objeto de investigación no tenga nada que ver con las incorporaciones oblicuas.

Este proceso ha sido particularmente difícil. En primer lugar, existen muy pocos textos en castellano que hayan resultado útiles, con lo que se ha tenido que recurrir principalmente a publicaciones en inglés. En este idioma sí que se ha encontrado una gran cantidad de referencias sobre seguridad vial y diseño de carreteras. La dificultad estribaba en localizar textos que realmente aportasen información relevante. La oblicuidad en intersecciones es citada en numerosos textos como algo a evitar, sin entrar en más detalles. Sin embargo, se han encontrado muy pocos estudios experimentales que sirvan para justificar esta afirmación. El presente estudio tiene la ambición de paliar, en parte, este déficit detectado.

Una vez que tenemos una base de conocimientos de la que partir, podemos comenzar el **diseño experimental**. Este proceso consiste en determinar qué aspectos se van a estudiar y cuál va a ser la metodología con la que se van a obtener datos estadísticos reales.

Para ello, se confecciona una lista de variables o factores que, a priori, pueden resultar explicativos del fenómeno. Esta lista se jerarquiza en función de su importancia y la facilidad de obtención de datos experimentales relacionados. Posteriormente se procede a concretar la forma en la que se obtendrán esos datos.

Tras haber recogido los datos estadísticos necesarios, en lo que se denomina **ejecución experimental**, hay que iniciar el análisis de lo obtenido: el **análisis de resultados.** Se persigue con este proceso identificar relaciones entre las variables estudiadas que permitan confeccionar un modelo de la realidad. Este proceso exige capacidad de abstracción, imaginación, y sólidos conocimientos de estadística, que es la herramienta a utilizar para analizar los datos.

La toma de datos ha consistido, principalmente, en grabaciones de tráfico en las inmediaciones de intersecciones con problemas de oblicuidad. Se ha obtenido una gran cantidad de datos, registrados en un gran número de cintas de video. Pero sólo se han procesado las maniobras de un número reducido de las mismas, debido a la lentitud de este proceso. Con el fin de acelerarlo, se ha desarrollado un programa informático que facilita la restitución de trayectorias grabadas en video digital.

Con el fin de facilitar la aplicación práctica del modelo diseñado, se ha desarrollado otro programa informático. La intención era obtener un programa que cumpliese con las expectativas inicialmente propuestas, que se han descrito en un apartado anterior. Estos objetivos resultaron ser demasiado ambiciosos y sólo han podido satisfacerse en parte.

Con el fin de poner en práctica las conclusiones obtenidas, y aplicar el modelo desarrollado, se ha seleccionado una intersección real, con problemas de oblicuidad, para su estudio y propuesta de mejora. La **aplicación práctica** analiza la situación actual del enlace de la CV-35 con la CV-336 en San Antonio de Benagéber (Valencia), identificando los ramales con problemas de oblicuidad, y proponiendo soluciones a estos problemas. Las actuaciones planteadas se han descrito mediante diferentes planos de detalle, y se ha realizado una valoración aproximada del coste de las obras.

Con este estudio queda patente la utilidad práctica de esta investigación, pudiendo servir de base para su aplicación en otras intersecciones de la red de carreteras. Por otro lado, partiendo de este informe, se plantea la posibilidad de redactar un proyecto constructivo de remodelación y adecuación del citado enlace.

Los últimos apartados del documento son **anexos**. En ellos se refleja información relativa al proyecto que, por su extensión, se ha preferido separar del texto principal. En concreto, se incluyen los listados de los datos experimentales obtenidos tras el procesado de los videos, y que han sido la base del análisis.

2ª PARTE

ESTADO DEL ARTE

4 Sistemas y modelos en ingeniería

4.1 Visión sistémica de la conducción

Consideraremos un **sistema** formado por una serie de elementos que interactúan entre sí de diversas maneras. Cada elemento se caracteriza por poseer unas cualidades, estar sujeto a una serie de normas y tener relaciones específicas con el resto de elementos del sistema. Bertalanffy (1968) define sistema como el conjunto de elementos y de relaciones entre elementos. Y sistema abierto como aquél que también tiene relaciones con su entorno. Las relaciones se entienden en un sentido amplio (intercambio de información, de energía, de masa).

En dicho sistema integraremos todos los **elementos** que intervienen en el fenómeno de la conducción. Así pues, tendremos un conjunto de elementos pasivos o estáticos, que presentan una respuesta nula o mínima frente a estímulos del resto de elementos. En este conjunto situamos el firme de la vía, la señalización pasiva, el entorno urbanístico, las barreras y obstáculos, etc.

En otro grupo tendremos elementos que denominaremos "mecánicos" pues su respuesta frente a la interacción de otros elementos es perfectamente predecible. En este grupo se incluyen los vehículos, la señalización activa.

El último grupo y más complejo son aquellos elementos cuya respuesta es aleatoria y difícilmente predecible. Es el elemento clave de la investigación: las personas. Si bien cuando conducimos lo hacemos según unos hábitos de conducción bastante definidos, la respuesta del conductor frente a los estímulos puede ser muy variable, entre diferentes individuos y también para el mismo individuo, debido a todo tipo de circunstancias psicológicas.

Este sistema presenta una serie de **propiedades** que se enumeran en el apartado 4.3.2.

Para profundizar más sobre la teoría de sistemas y sus aplicaciones a diversas ramas de la ciencia, pueden consultarse a Bertalanffy (1968), Bertalanffy y otros (1972), o Lilienfeld (1984).

4.2 Objetivo: comprender el sistema

Esta forma de concebir el objeto de nuestro estudio como un sistema nos ayuda a comprender los objetivos que se pretenden alcanzar con dicho estudio. Este estudio se enmarca en la necesidad del ingeniero investigador de conocer la realidad con la que trata, con el fin de modelar sus propiedades y poder predecir su comportamiento.

Para el diseño de carreteras, el ingeniero necesita conocer el comportamiento del sistema que va a crear al construir-modificar una nueva vía. De la misma manera que un ingeniero estructural necesita conocer el comportamiento de la viga que se va a construir, antes de que dicha construcción se realice.

Desafortunadamente, nuestros conocimientos actuales sobre el sistema que rodea a una vía (conductores, vehículos, la propia vía), son menores que los que tiene un ingeniero estructural sobre el comportamiento tenso-deformacional de una viga. Las modelaciones que somos capaces de realizar para simular la realidad de una vía son, necesariamente, muy simplificadas.

Así pues, este estudio de investigación se enmarca en la citada necesidad del ingeniero de conocer de antemano qué va a pasar con la vía que está proyectando. **El proyectista necesita simular la construcción y explotación de la carretera**. Para ser capaz de modelar este fenómeno de manera global son necesarias numerosas investigaciones que abarquen diferentes ámbitos del problema. El problema es muy complejo, pero la subdivisión del mismo en problemas parciales puede llegar a ayudarnos. No obstante, no hemos de perder de vista nuestro objetivo final.

Esta investigación pretende aportar algo de luz sobre el fenómeno de la conducción en intersecciones e incorporaciones oblicuas. Esto significa que, de entrada, restringimos nuestro estudio a una determinada situación específica. Sólo analizaremos lo que ocurre en el entorno de intersecciones entre vías o incorporaciones entre carriles, que tengan un determinado ángulo.

Posteriormente, si alcanzáramos a comprender perfectamente lo que ocurre en el entorno de este tipo de intersecciones, podríamos integrar el modelo resultante en el modelo global de funcionamiento de una vía.

Pero, a lo largo de la investigación, como en cualquier otra, es muy importante tener una suficiente **capacidad de reducción y simplificación**. Los sistemas pueden llegar a ser extremadamente complejos, quizá irresolubles, quizá inabordables con los actuales medios de computación. Por ello el científico debe ser capaz de extraer los elementos, las propiedades y las relaciones más importantes, descartando las demás, pero de manera que el modelo resultante represente suficientemente bien a la realidad.

Bremermann estimó que cualquier máquina, sea cual sea su tecnología, tiene un límite de información que es capaz de almacenar y/o procesar. Este límite depende de la cantidad de materia contenida en ella, de la temperatura, y del tiempo considerado. Es un límite extremadamente grande, pero es un límite. Ahora bien, si consideramos una supermáquina con toda la masa de la tierra y la tecnología suficiente para alcanzar ese límite, durante toda la edad del universo, sería insuficiente para trabajar con algunos sistemas teóricos propuestos.

Esta idea sirve para ilustrar que nuestra capacidad de computación y cálculo siempre estará limitada. Por tanto, no basta con concebir un complicado sistema con múltiples variables, en las que las relaciones entre ellas puedan ser de cualquier tipo. Dicho sistema sería inabordable. La computadora no es capaz de simplificar el sistema y abstraer las propiedades y relaciones esenciales. Pero el científico sí. Lo que de verdad distingue a los genios del resto es su capacidad de simplificación. Hoy día la capacidad de cálculo no tiene mérito.

Como ejemplo, en el texto citado (Bertalanffy y otros, 1972) se comenta cómo lo verdaderamente meritorio de la ley de gravitación universal de Newton, no es que hubiera resuelto un problema matemático o computacional imposible. Tenía un sistema (el sistema solar) como una serie de elementos, y desconocía qué relaciones había entre ellos. Supo descartar los elementos pequeños, quedando sólo con el Sol y los planetas. Descartó acertadamente las relaciones de los planetas entre sí, y consideró que el elemento más importante era el Sol. Por tanto el problema se le redujo a considerar qué relación había entre un cuerpo grande y otro más reducido, independientemente del resto de elementos cercanos. Consideró que esa relación sólo dependía de la masa y la distancia. Y el problema quedó resuelto inmediatamente. Con ese modelo simplificado pudo explicar las trayectorias de los planetas alrededor del Sol, con suficiente aproximación. No obstante, hoy sabemos que las relaciones entre los elementos del sistema solar no son sólo gravitacionales, sino que hay campos electromagnéticos, que los planetas interaccionan entre sí, que los satélites influyen, aunque de manera reducida, y que el resto de cuerpos pequeños (asteroides, cometas), también tienen su función en el sistema. Newton supo

entender cuáles eran las cualidades fundamentales del sistema que estudiaba, para adecuarlo a los medios de cálculo de que disponía. Hoy, los astrónomos tienen medios de cálculo más complejos y son capaces de explicar mejor el comportamiento del sistema, con modelos mucho más complicados.

4.3 Nociones de la teoría de sistemas

4.3.1 Definiciones

El **estructuralismo** es un método que permite captar la realidad en su conjunto descomponiéndola en sus partes fundamentales y considerando las relaciones más importantes que vinculan a los componentes de esta realidad. El conocimiento surge de investigar las relaciones más importantes de sus elementos principales. La clave está en que discrima las relaciones secundarias y los elementos menos significativos.

Estructura es toda abstracción de la realidad, compuesta por los aspectos esenciales de la misma. La construcción de estructuras también se denomina elaboración de modelos abstractos.

Un **sistema** es un conjunto de elementos, atributos y relaciones entre ellos, orientados a la consecución de una serie de objetivos.

Por tanto, un sistema es una estructura o modelo, con una cualidad fundamental: tiene un objetivo o finalidad.

El **entorno** es el sistema complementario de lo que se quiere estudiar, de manera que la unión de sistema y entorno daría lugar a todo el universo conocido. Un sistema puede ser abierto si existe algún tipo de intercambio de información o energía con el entorno. Un sistema es cerrado si ese tipo de intercambio no existe.

4.3.2 Propiedades de los sistemas

Las propiedades de los sistemas se enumeran a continuación:

- Totalidad o emergencia. El sistema es cualitativamente superior a la suma de las partes.
- Interdependencia. Los cambios en un elemento del sistema repercuten en el resto.
- Finalidad. El sistema tiene unos objetivos.
- Divisibilidad y agregación. El sistema puede subdividirse en partes o subsistemas, y también puede aglutinarse con otros sistemas para formar supersistemas.
- Centralización. Determinados elementos del sistema pueden ser esenciales en el funcionamiento del mismo, de manera que puedan despreciarse las contribuciones de elementos satélites o secundarios.
- Organización. Los elementos del sistema pueden tener una jerarquía.
- Dinamicidad. El sistema está en continua evolución. Su estado cambia para adaptarse a las condiciones del entorno.
- Adaptación. El sistema tiene una capacidad de reacción frente a estímulos del entorno.
- Historicidad. El estado del sistema en un instante determinado depende del estado en momentos anteriores.

- Homeóstasis. Es la tendencia del sistema hacia el equilibrio o estabilidad con el entorno y entre los elementos del mismo.
- Control. Algunos sistemas tienen la capacidad de ajustar o dirigir su comportamiento hacia la finalidad requerida.
- Isomorfismos. Se dice que dos sistemas son isomorfos si puede establecerse entre ellos alguna analogía o correspondencia biunívoca.

4.3.3 Proceso de modelización

El proceso de modelización es el método por el cual somos capaces de abstraernos y **construir una estructura explicativa de la compleja realidad**. Según el método científico, tiene una serie de pasos:

- Observación de la realidad.
- Especificación del modelo, determinando los elementos, y relaciones entre sí.
- Estimación de parámetros del modelo. Particularizamos el modelo para ajustarlo a una situación real concreta.
- Constratación del modelo. Se comprueba que los resultados del modelo son similares a los de la realidad conocida.
- Predicciones del modelo. El modelo se usa para predecir situaciones futuras o hipotéticas, que permiten diseñar o proyectar actuaciones ingenieriles sobre la realidad.

El resultado de un proceso de modelización **no es único** pues es el resultado de un proceso de abstracción subjetiva de la realidad. Distintos investigadores llegarán a modelos diferentes de la misma realidad, todos ellos igualmente válidos e igualmente deficientes. A la hora de valorar diferentes aproximaciones a un mismo problema, hemos de analizar si los resultados de la modelización se ajustan a la realidad, en qué aspectos el ajuste es peor, la complejidad del modelo, el coste (tiempo y dinero) de construcción del modelo, el coste de parametrización a una situación real, y el coste de evaluación o aplicación del modelo a situaciones concretas.

4.3.4 Indicadores

En el proceso de modelización, es necesaria una fase inicial de observación de la realidad. Una herramienta bastante potente para ello es el uso de indicadores. **Un indicador es un parámetro empírico**, que proporciona información acerca de un fenómeno. Es una variable que toma una serie de valores en función del estado del sistema. Los hay cuantitativos y cualitativos. Pueden ser magnitudes estáticas, recuento de elementos, o stock. O bien valores de flujo, tasa de cambio, variaciones en una variable durante un lapso de tiempo.

Para elegir **los indicadores más adecuados**, ha de tenerse en cuenta que un indicador debería ser:

- Pertinente: apropiado a los objetivos, al aspecto que se quiera conocer.
- Solvente: se ha demostrado una relación directa entre el indicador y el aspecto de la realidad que se quiere estudiar.

- Sintético: capaz de describir el fenómeno por sí solo, sin necesidad de otros indicadores.
- Sencillo: fácil de obtener, de interpretar.
- Barato: buena relación coste-beneficio.
- Espacialmente fiable: que pueda aplicarse en distintos lugares.
- Temporalmente fiable: que pueda aplicarse en distintas épocas.
- Sensible: las pequeñas variaciones en la realidad quedan reflejadas en variaciones en el parámetro.
- Preciso: su valor puede determinarse con precisión en todo momento.
- Admitido: basado en estándares internacionalmente aceptados.
- Actualizado: los valores que conocemos de él son recientes. La frecuencia de actualización de su valor es alta.

4.4 Elementos del sistema de la conducción

El fenómeno de la conducción puede verse simplificadamente como un proceso con un **flujo de información** claramente definido. El **conductor** va extrayendo de su entorno la información que necesita, la procesa, y envía una respuesta al vehículo. A su vez, el **vehículo** recibe esa información, responde de una determinada manera e interactúa con ese **entorno**. Por último, puede haber elementos en el entorno que respondan a la actividad de los vehículos, como, por ejemplo, otros conductores o peatones (en general, otros usuarios de la vía), con lo que el entorno variaría iniciándose un nuevo ciclo.

Según la definición sistémica desarrollada anteriormente, el conductor es un elemento activo, que va percibiendo información, procesándola, y respondiendo de una determinada manera. Su respuesta, en principio, es bastante aleatoria.

Junto con el conductor tenemos un elemento asociado que es el vehículo en el que circula. Este elemento depende especialmente de los mandatos que el conductor le transmita, y responde frente a ellos de una determinada manera. La respuesta del vehículo depende de las características del mismo, por lo que puede ser conocida (con un grado de incertidumbre relativamente bajo). De esta manera, la aceleración que desarrolla depende de la magnitud del impulso enviado por el conductor al pisar el acelerador, pero también de la potencia del motor y de la masa del vehículo. El vehículo también interactúa con otros elementos del sistema, por ejemplo con el pavimento, o con las barreras de contención (en caso de accidente). Pero este tipo de relaciones son menos importantes para el objetivo de la investigación.

El conductor extrae información de su entorno, es decir, del resto de elementos del sistema: el firme, la señalización, el balizamiento, el entorno de la vía, el resto de usuarios de la misma, su propio vehículo, etc.

A continuación se muestra un esquema que resume lo descrito (Figura 4-1). Las flechas indican el sentido de la información. El usuario recibe información de su propio vehículo, de la vía (y sus elementos), y de otros vehículos. Tras procesarla, actúa sobre su vehículo. Y éste interactúa con la propia vía.

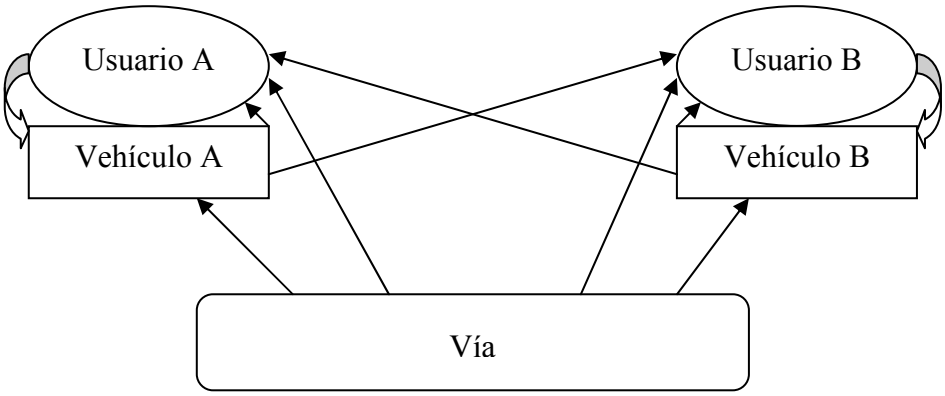


Figura 4-1. Flujo de información en el modelo de tráfico

Los usuarios pueden interactuar entre sí, pero de manera muy limitada. La comunicación sólo puede ser visual (por gestos) si se da la condición de que estén relativamente cerca y a poca velocidad relativa. La manera de comunicación entre conductores suele ser a través de sus vehículos. Por ejemplo, un conductor le indica al resto que quiere realizar un cambio de carril encendiendo la bombilla intermitente de color anaranjado adecuada.

En el anterior esquema podemos apreciar una de las propiedades de los sistemas que se describían anteriormente: la **agregación**. En el elemento "vía" hemos agregado (para simplificar el esquema) los diversos elementos que la componen: señalización, barreras, firme, etc. De la misma manera que el elemento "vehículo" podría subdividirse en múltiples elementos si quisiéramos estudiar el funcionamiento de los automóviles. Obviamente, no es el caso.

En el anterior esquema podemos ver en qué consiste el **estado** del mismo. En un instante determinado, el usuario estará realizando una serie de procesos mentales, su vehículo tendrá una velocidad y posición determinadas, la vía tendrá unas cualidades específicas.

La **historicidad** del sistema se manifiesta en que el valor de las distintas variables que explican el estado del mismo depende directamente del valor que tomaron en tiempos anteriores. Por ejemplo, la posición de un vehículo depende directamente de la posición que tenía en un instante anterior.

Entre las **reglas** que definen el comportamiento del sistema encontramos aquéllas que explican el funcionamiento de los vehículos. Pero también reglas más complejas como el proceso por el cual un conductor decide o no iniciar una maniobra.

4.5 Modelos en Ingeniería

El Ingeniero, en el ejercicio de su profesión, utiliza dos tipos de modelos. En primer lugar, cuando necesita comprender un fenómeno, utiliza modelos descriptivos. Estos modelos tratan de acercarse a la realidad en su enorme complejidad, describiendo de manera simplificada, sus facetas más importantes. Por otro lado, están los modelos utilizados en el diseño. El objetivo de estos modelos no es reproducir un fenómeno real, sino comprobar el funcionamiento de la obra de ingeniería, quizá todavía no construida, en la situación más desfavorable razonablemente posible.

La principal diferencia entre unos modelos y otros radica en los valores adoptados para las variables del problema. En un modelo descriptivo, se toman los valores reales, observados, valores normales. En un modelo de diseño, todas las variables adoptan valores extremos, prácticamente improbables.

Por lo demás, podría tratarse del mismo modelo conceptual, basado en las mismas relaciones, formalizadas en las mismas ecuaciones. La diferencia radica en los datos de entrada del modelo. Por ejemplo, para estudiar el funcionamiento de una viga, según el modelo descriptivo, tomaremos el valor del peso realmente colocado sobre ella, y de su resistencia real. Para diseñar la viga, escogeremos el valor de la mayor carga que, a lo largo de los años de uso, es posible que reciba, y los valores mínimos de resistencia que se pueden garantizar. Si, con esos datos de partida, el modelo predice que la viga resiste, una vez construida, tendremos un razonable margen de seguridad, que permite afirmar que dicha viga resistirá cualquier situación.

Dentro de los modelos de diseño, existen diversas estrategias para conseguir estudiar el peor de los casos probables.

La técnica de los coeficientes de seguridad se basa en tomar los valores medios de las variables involucradas, para luego multiplicarlos por unos factores. Si la variable es favorable, se minora su efecto multiplicando su valor por un coeficiente menor que uno. En caso contrario, si es desfavorable, se mayora su efecto multiplicando el valor medio por un coeficiente mayor que la unidad. Se trata de una técnica sencilla.

La técnica de los estados límite, utiliza la misma filosofía que la de los coeficientes de seguridad, pero repite el cálculo para diferentes hipótesis o estados límite. El diseño resulta satisfactorio si todos y cada uno de los cálculos realizados lo son. Cada cálculo individual se realiza según el modelo correspondiente, tomando valores extremos de las variables (valores medios multiplicados por un factor).

Una variante de esta técnica consiste en tomar valores extremos de la distribución estadística asociada a cada variable. Exige conocer esta distribución. En vez de multiplicar el valor medio por un factor, se toma el valor extremo de los valores observados. Con frecuencia se suele adoptar el valor que sólo es superado por el 5% de los casos.

Por último, si conocemos las distribuciones estadísticas de cada una de las variables, seríamos capaces de calcular la probabilidad de que se dé una situación, de que concurran unos valores concretos de las variables. De esta manera se calcula la probabilidad de fallo de la obra proyectada. Si esta probabilidad es razonablemente baja (nunca llega a ser nula), el diseño es adecuado. Ésta es la **técnica de distribuciones estadísticas**. Hay que destacar que la principal dificultad que se plantea es conocer bien la distribución de probabilidad de cada una de las variables, especialmente, las colas de la distribución. Es usual encontrarse una cierta imprecisión en el conocimiento de esas colas, y, sobre todo, de las colas de las distribuciones condicionadas (la distribución de los valores de "x", condicionada a cuando "y" toma el valor "y_0").

Estas estrategias también se aplican a los sistemas de tráfico. En concreto, a las maniobras de incorporación. El diseño de un carril de incorporación tiene como objetivo que los conductores que lo usen, realicen la maniobra de manera segura y cómoda, y que los gastos derivados de la misma (especialmente, su construcción), sean pequeños.

Los datos de partida de cualquier modelo que explique el funcionamiento de una incorporación serán las características de los vehículos implicados, de los conductores implicados, de la propia vía, y del entorno.

Con la técnica de los coeficientes de seguridad, tomaríamos los valores medios de estas variables (el vehículo medio, el conductor medio, el pavimento medio,…) multiplicados por los correspondientes factores.

Con la técnica de los estados límite, consideraríamos diferentes hipótesis de cálculo. Por ejemplo, considerar un caso para los vehículos ligeros y otro para los pesados, un caso con lluvia y otro sin ella, etc.

Con la técnica de las distribuciones de probabilidad, identificaríamos en qué situaciones la incorporación no funciona (se produce un accidente, se producen grandes demoras,…) y calcularíamos la probabilidad de que eso ocurra.

4.6 Microsimulación de sistemas de tráfico

4.6.1 Funcionamiento

Existe una nueva técnica, que se aplica a sistemas de tráfico, denominada "**microsimulación**". Cada elemento del sistema es modelado como sistema individual, aislado. El modelo del sistema completo se construye a partir de los micromodelos de cada uno de sus elementos. Se define una situación inicial, con el estado de cada uno de los elementos integrantes del sistema. Posteriormente, por intervalos de tiempo, se calcula la evolución del sistema. Cada elemento del mismo interacciona con el resto de elementos del sistema y del entorno, para definir su nuevo estado. El estado del sistema en un instante determinado es la suma de los estados de sus elementos constituyentes.

En ingeniería de tráfico, **el elemento básico del modelo es el conductor en su vehículo**. Se concibe un modelo que representa el comportamiento de este elemento. Se define una situación inicial, con cada uno de los conductores y vehículos considerados en una posición de la vía. Y después, por intervalos de tiempo, se calcula la evolución de los mismos. Para cada instante considerado, se calcula la reacción del conductor en función del estado de la vía, su posición en la misma, y de los demás vehículos que haya. El estado del sistema en conjunto es la suma de los estados de cada uno de los conductores-vehículos considerados.

Estos modelos de microsimulación requieren de potentes computadoras y sofisticados programas informáticos. En ellos, se introduce la geometría y características de la vía a considerar, los vehículos que circulan por la misma, y se pide al sistema que calcule la evolución temporal de estos vehículos sobre la vía.

Las partes más importantes de estos sistemas son las siguientes:

- **Rutina de generación de vehículos**. Además de los vehículos inicialmente situados sobre las vías, el sistema puede simular la llegada de vehículos al tramo analizado, de manera aleatoria, o según unas pautas prefijadas. Por ejemplo, algunos simuladores identifican la llegada de nuevos vehículos como una variable aleatoria que sigue una distribución de Poisson, donde el parámetro es el tiempo medio de llegada entre vehículos.
- **Rutina de salida de vehículos del sistema**. Cuando los vehículos llegan al límite del sistema, el programa debe hacerlos desaparecer, liberando memoria, pues salen de la zona de estudio.
- **Rutina de conducción**. Simula el comportamiento del conductor, decidiendo la velocidad y trayectoria que debe seguir. Puede dividirse en tres subrutinas fundamentales:

  - movimiento en flujo libre, en la que el conductor decide su trayectoria y velocidad sin la interferencia de ningún otro vehículo.
  - movimiento condicionado, en la que el conductor circula detrás de otro.
  - cambio de carril, en la que el conductor decide qué carril es el que prefiere, o el que debe tomar para seguir una ruta, y realiza la maniobra necesaria para alcanzarlo.

- **Rutina de funcionamiento de la semaforización**, si existe.
- **Rutina de estado**. Almacena la posición, velocidad, y estado de cada uno de los elementos del sistema (vehículos, semáforos,…), para que esta información esté disponible para el resto de rutinas.
- **Rutina de registro de información**. Cada evento que se genera es registrado para la posterior redacción de informes. El programa, tras calcular el funcionamiento del sistema durante días, puede resumir los resultados mostrando la información que se le requiera (tiempos de espera, intensidades de tráfico, conflictos que han ocurrido, maniobras llevadas a cabo).

4.6.2 Microsimuladores más usados

Diferentes empresas de desarrollo de software comercializan y distribuyen algunos de estos programas. En otros casos, son grupos de investigación, que desarrollan sus propios programas. A continuación se citan algunos de los más extendidos.

En las capturas de pantalla que se acompañan puede observarse cómo el programa muestra la posición de cada vehículo, en ese momento determinado, mediante un rectángulo situado en las vías. La red viaria ha sido previamente introducida por el usuario, como condiciones de contorno, con sus señales y regulación por semáforos.

La Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration) de Estados Unidos ha desarrollado el **simulador CORSIM**. A continuación se muestra una imagen de pantalla de este programa, más concretamente, del módulo visualizador, denominado TRAFVU.

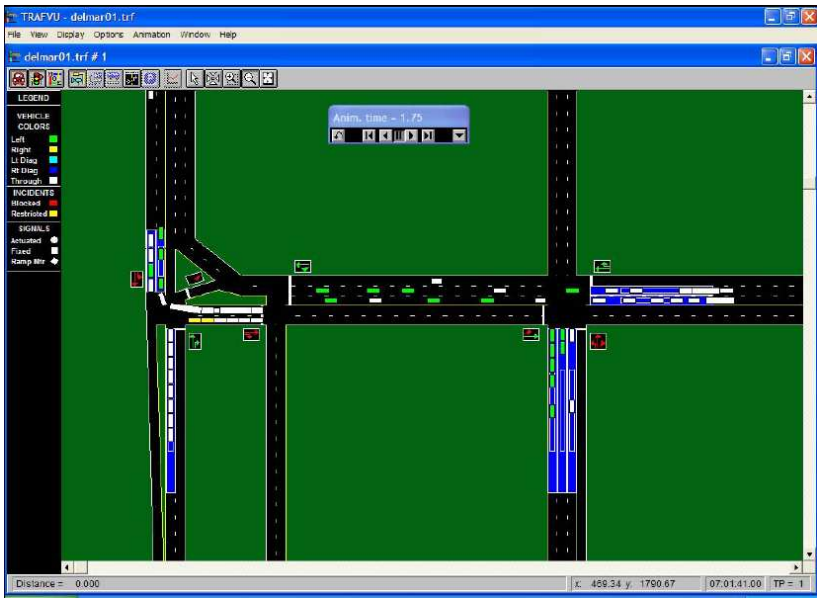


Figura 4-2. Captura de pantalla del programa CORSIM

La siguiente imagen es del **simulador SimTraffic**, de Trafficware Corporation.

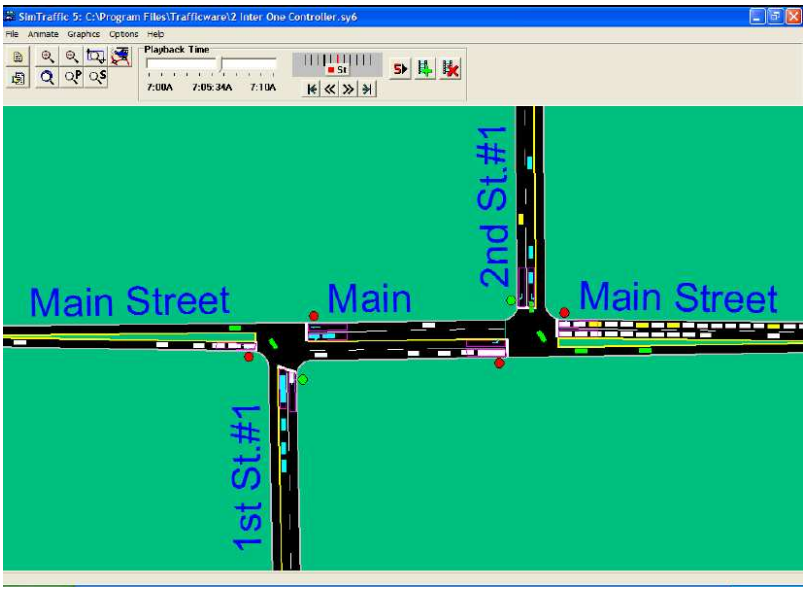


Figura 4-3. Captura de pantalla del programa SimTraffic

A continuación se muestra la imagen correspondiente al **simulador VISSIM**, desarrollado por PTV AG / ITC Inc.

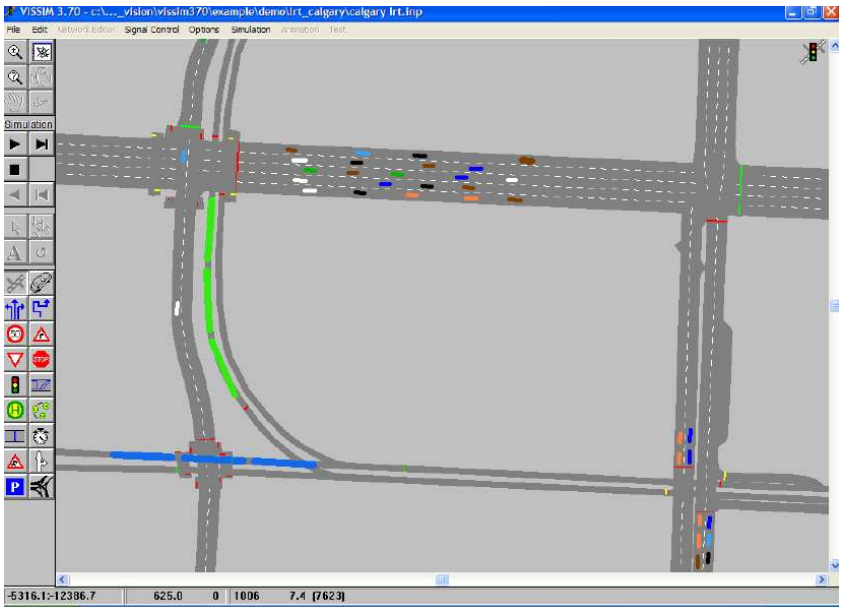


Figura 4-4. Captura de pantalla del programa VISSIM

Otros simuladores son el "Helsinki Urban Traffic Simulation", conocido como HUTSIM; el "Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks" (AIMSUN); el "Massachusetts Institute of Technology Simulator" (MITSIM); el "High performance transport network modeling and simulation" (HIPERTRANS), desarrollado bajo el auspicio de la Unión Europea; el PARAMICS;…

Para los fines de la presente investigación se ha desarrollado un simulador sencillo, denominado **ValSim**. Se trata de una herramienta cuyo objetivo es permitir al ingeniero evaluar una configuración de un enlace, y comprobar si hay riesgo o no de que se produzcan conflictos en las incorporaciones y cruces oblicuos que se planteen. Esta herramienta informática es descrita con detalle en un capítulo posterior.

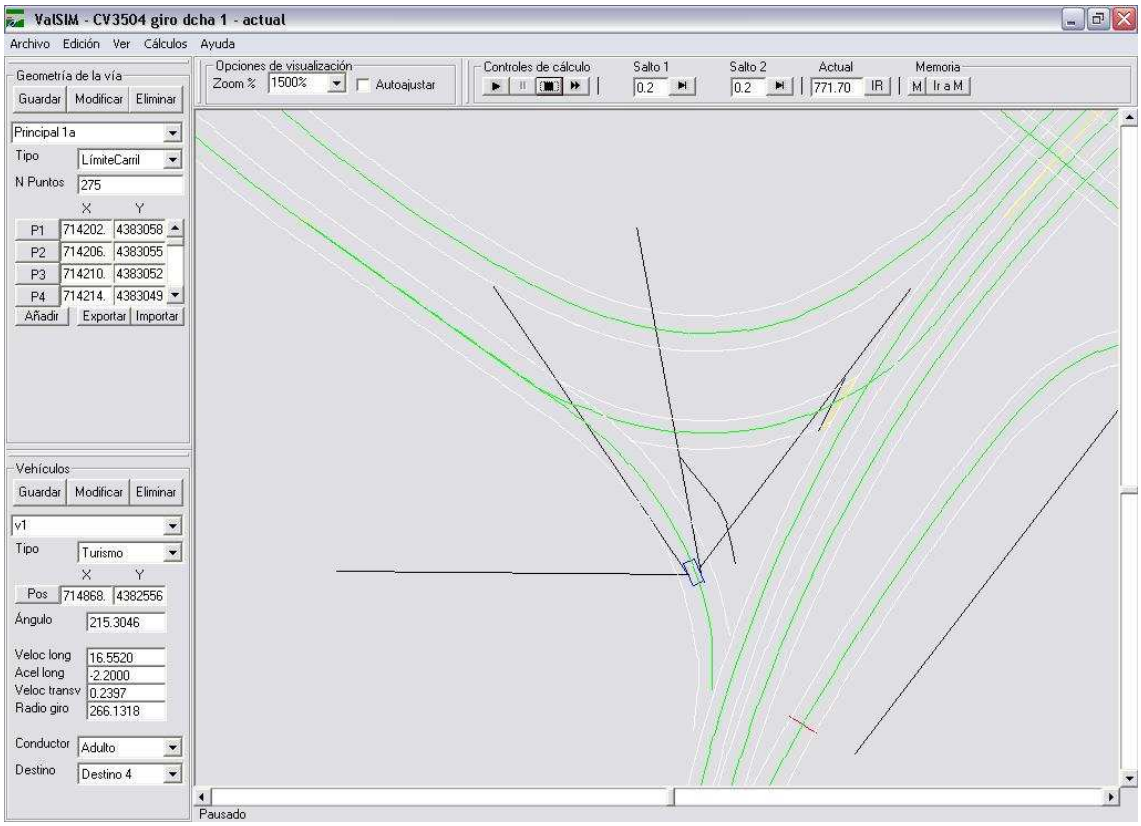


Figura 4-5. Captura de pantalla del simulador ValSim

4.7 Conclusión

En este apartado se ha visto cómo la **teoría general de sistemas** puede proporcionarnos una base metodológica con la que construir los modelos que se pretenden desarrollar. Estos modelos, como abstracciones de la realidad, intentan emular las partes más importantes de ésta, pero de una manera simplificada, para que sean abordables con las herramientas de cálculo disponibles.

Se ha expuesto que todo **sistema** está formado por elementos. En concreto, el sistema de la conducción que se analizará en este estudio considera como elemento base el conductor en su vehículo, interaccionando con el resto de elementos de la vía.

Por último, se ha presentado la **microsimulación** como una técnica de implementar modelos complejos con la ayuda de la gran capacidad de computación que actualmente tienen los ordenadores. Esta técnica se presenta como particularmente efectiva al estudiar sistemas dinámicos, que evolucionan en el tiempo.

5 Nudos

5.1 Definiciones

De manera general, un **nudo** es el lugar donde dos o más vías se intersecan. Los nudos constituyen una parte esencial de una red viaria, ya que en ellos el usuario puede cambiar de dirección para seguir el camino que desee. Constituyen elementos de discontinuidad en la red, y, por tanto, presentan situaciones críticas que hay que tratar de forma especial. El presente trabajo se va a concentrar en esta parte de la carretera.

Los nudos pueden clasificarse según diversos criterios. Las definiciones y conceptos que se aporten aquí están extraídos de Kraemer y otros (1994) y de Valdés (1970).

Definiremos **intersección** como un nudo en el que todas las trayectorias se hacen al mismo nivel. Por el contrario, un **enlace** es un nudo en el que, al menos, uno de los cruces se realiza a distinto nivel.

Figura 5-1. Foto de una intersección

Figura 5-2. Foto de un enlace

En un nudo aparecen diversos puntos conflictivos, que son aquellos en los que se intersecan dos trayectorias. Podemos distinguir entre:

Divergencia o bifurcación. De una trayectoria surgen dos que se separan.

Figura 5-3. Esquema de divergencia

Convergencia. Dos trayectorias que confluyen a una sola. Si ambas tienen un nivel similar de preferencia, se habla de confluencias. Si una tiene una preferencia clara sobre la otra, se habla de incorporaciones.

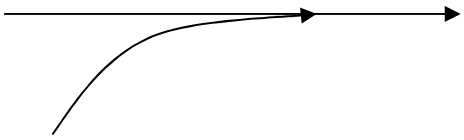


Figura 5-4. Esquema de convergencia

Cruce o intersección. Dos trayectorias que se intersecan, con un cierto ángulo.

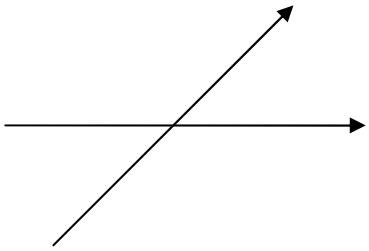


Figura 5-5. Esquema de cruce

5.2 Importancia

La importancia de los nudos puede analizarse desde tres puntos de vista distintos.

Explotación

Por un lado, son puntos críticos en la explotación de la vía pues su capacidad determina el flujo de toda la red. Si una intersección está colapsada, funcionará como cuello de botella de las vías que acceden a ella, de manera que el colapso se propaga por la red viaria.

Seguridad

Por otro lado, una tercera parte de los puntos negros (tramos cortos de una red viaria en donde los accidentes de tráfico son frecuentes) suelen ser nudos. La accidentalidad es muy alta en estos puntos, por lo que hay que cuidar el diseño y explotación de los mismos.

Economía

Por último, los nudos concentran una parte alta de presupuesto. Esto es debido a que ocupan una mayor superficie que el resto de la carretera. En ellos hay una gran cantidad de pavimento. Una gran parte de la señalización y balizamiento se concentra en las intersecciones. Y, sobre todo, en los nudos de tipo enlace se necesitan estructuras para materializar el cruce a diferente nivel.

5.3 Criterios básicos de diseño

Los siguientes criterios aparecen abundantemente en la literatura, en diversas formas. Aquí nos ceñiremos a las "Recomendaciones para el proyecto de intersecciones" (Ministerio de Fomento, 1968).

Preferencia de los movimientos más importantes.

Las trayectorias más importantes, con más tráfico, más velocidad, deben tener preferencia sobre otras secundarias. Las limitaciones y restricciones las impondremos a los movimientos secundarios.

Reducción del área de conflicto.

El área de conflicto es la zona en la que dos trayectorias se intersecan, divergen o confluyen. Si esta zona es grande, será mucho más difícil prever el comportamiento de los usuarios, aumenta la confusión de los mismos, y aumenta el riesgo de accidente. El área de conflicto aumenta mucho con la oblicuidad de la intersección, por lo que es un argumento a favor de reducir al mínimo esta oblicuidad.

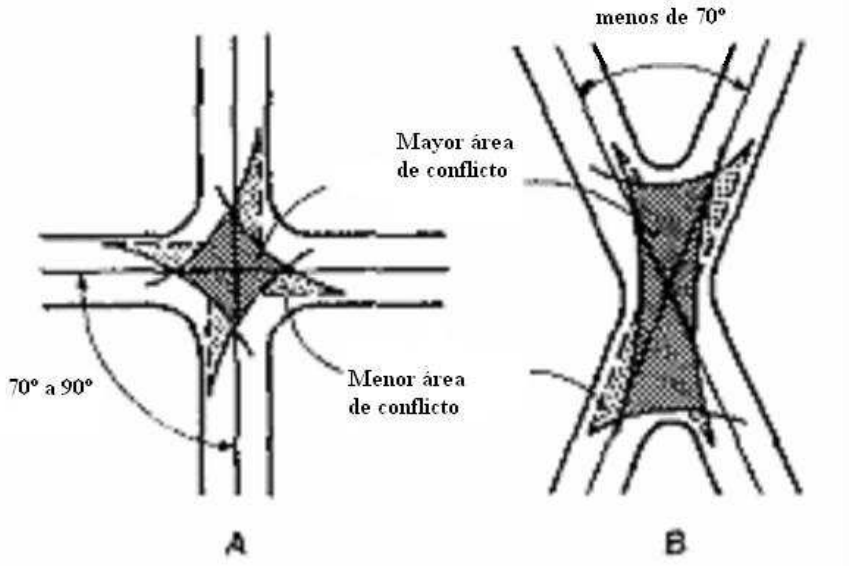


Figura 5-6. Área de conflicto y oblicuidad

Perpendicularidad de las trayectorias cuando se cortan.

La perpendicularidad facilita la maniobra, hace que el tiempo de cruce sea menor, reduce el área de conflicto, reduce la severidad del posible choque. Una vez más, se argumenta que ángulos muy alejados de 90º no son recomendables.

Paralelismo de las trayectorias cuando convergen o divergen.

Lo ideal es que estas trayectorias fueran tangentes en el punto de divergencia o convergencia, para facilitar la fluidez de la circulación. En las citadas "recomendaciones" no se habla de esto, pero también es para facilitar al conductor la visibilidad por su retrovisor, en el punto de decisión.

Separación de los puntos de conflicto.

Mediante la canalización adecuada pueden separarse los puntos de conflicto en una intersección, con lo que los conductores no necesitan atender simultáneamente a varios vehículos (uno por cada trayectoria con la que se cruza en poco espacio).

Separación de los movimientos.

Si una determinada trayectoria tiene una gran demanda, es recomendable dotarla de una vía específica para ella. De esta manera no influirá con otras trayectorias cercanas.

De la misma manera, hemos de tratar adecuadamente a peatones y ciclistas, para que no entren en conflicto con los usuarios motorizados.

Control de la velocidad.

Mediante el diseño de la intersección ha de inducirse en el conductor una disminución paulatina de la velocidad con respecto a la que lleva en un tramo libre. De manera que los vehículos involucrados en una intersección no tengan velocidades excesivas, y se limite la frecuencia y gravedad de los accidentes.

Hay diversas formas de conseguir esto: disponiendo curvas de radio adecuado, con una rampa ascendente (si el trazado en alzado lo permite), por medio del "efecto pared" si se colocan árboles, o barreras junto a la calzada, etc.

Sin embargo, esto ha de realizarse con cuidado pues las plantaciones pueden suponer un obstáculo para la visibilidad.

Control de los puntos de giro.

Asimismo, la canalización permite evitar giros en puntos no convenientes, por ejemplo, en aquellos en los que el conductor no tenga visibilidad.

Creación de áreas protegidas.

Las isletas proporcionan a los vehículos un área de almacenamiento en la que esperar un hueco en la vía principal para realizar la maniobra, convenientemente separada del resto de vehículos.

Visibilidad.

Debe intentar garantizarse la máxima visibilidad para todos los usuarios de la intersección, de manera que puedan tomar sus decisiones de forma adecuada. El conductor debe apercibir la intersección con tiempo suficiente para adecuar su velocidad y elegir adecuadamente su trayectoria.

Previsión.

Las intersecciones requieren de superficies amplias en las que construirse, que han de preverse desde la fase de planeamiento del proyecto.

Sencillez y claridad.

Las intersecciones complicadas, que se prestan a dudas y a malas interpretaciones, no son convenientes. La intersección debe ser simple y claramente comprensible.

5.4 Opciones para el conductor en el nudo

Los nudos pueden clasificarse un función de cómo dan respuesta a cada uno de los tipos de trayectorias presentes en él. Antes de hablar de dicha clasificación, hemos de definir estos tipos.

Desde cada uno de los orígenes, es decir, de los carriles que acuden a la intersección, pueden partir 3 trayectorias distintas:

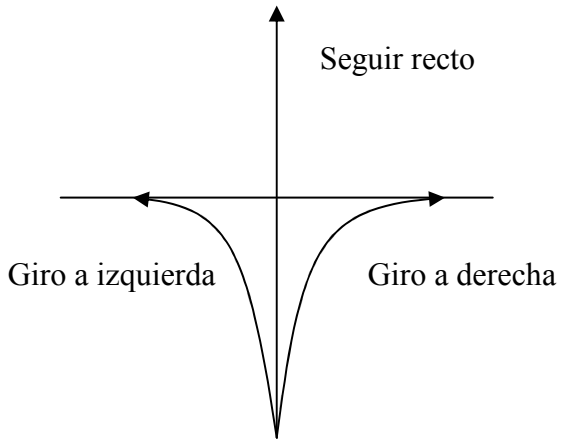


Figura 5-7. Esquema de opciones en un nudo

Una para **seguir recto**, cruzándose con otras trayectorias.

Otra para **girar a la derecha**, que empieza en una divergencia respecto de la que sigue recto, y termina en una convergencia con una trayectoria de la otra vía.

Una última para **girar a la izquierda**, que empieza en una divergencia respecto de la que sigue recto, realiza algún cruce (al mismo nivel o a distinto) y por último una convergencia con otra trayectoria de la otra vía.

En algunos nudos, alguna de las trayectorias puede no estar permitida y estar ausente. Por otro lado, otros nudos, con múltiples ramales, pueden tener más opciones para el conductor. Pero las tres opciones descritas aquí son las básicas.

5.5 Tipos de ramales de giro

Cada una de estas trayectorias tendrá un "ramal" por el que circula, que se define como cada uno de los carriles que concurren en la intersección y que forman parte de ella.

El **giro a derechas** se suele hacer "**directo**". Esto significa que la divergencia inicial se hace por la derecha de la vía de la que procede. Y la convergencia final se hace por la derecha de la vía a la que converge.

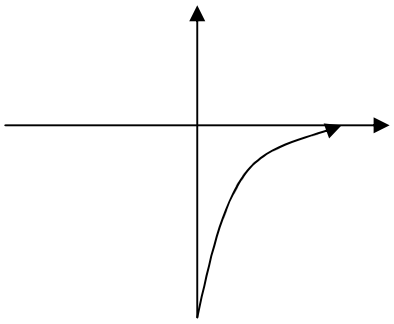


Figura 5-8. Esquema de giro a derechas directo

El **giro a izquierdas** es "**directo**" si sale por la izquierda y se incorpora por la izquierda.

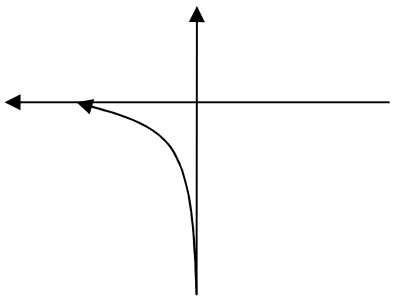


Figura 5-9. Esquema de giro a izquierdas directo

El **giro a izquierdas** es "**semidirecto**" si el lado por el que sale es distinto del que entra.

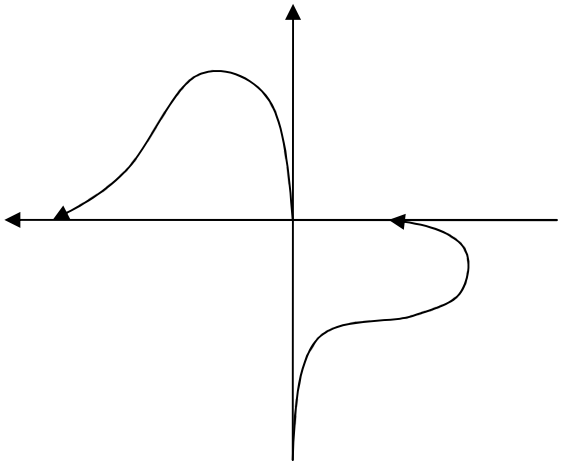


Figura 5-10. Esquemas de giros a izquierdas semidirectos

El **giro a izquierdas** es "**indirecto**" si diverge de la vía de la que procede por la derecha, y se incorpora a la nueva vía por la derecha también.

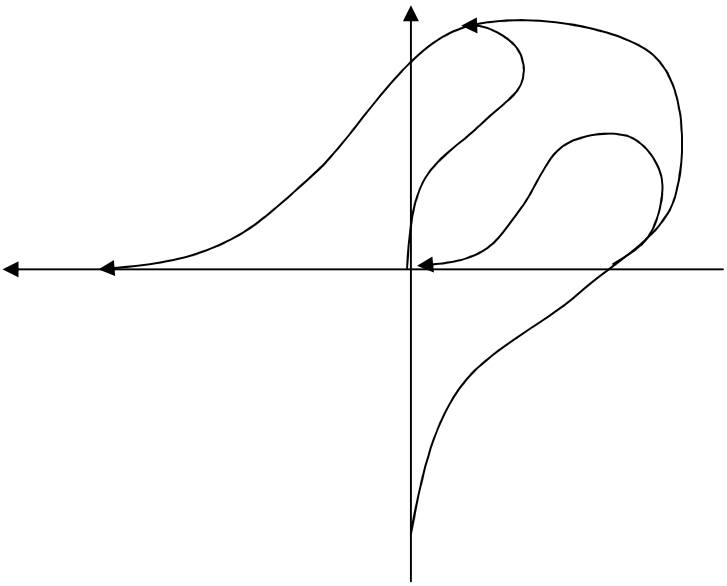


Figura 5-11. Esquemas de giros a izquierdas indirectos

Un tipo de giro a izquierdas muy utilizado, por su sencillez, es el **lazo**.

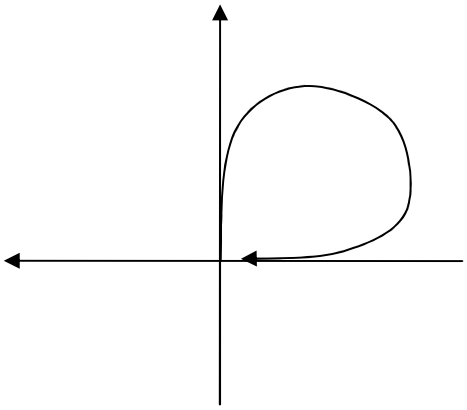


Figura 5-12. Esquema de un lazo (giro a izquierdas indirecto)

5.6 Tipos de nudos

Se trata de una clasificación general, en función del número de vías que acuden al nudo, y del ángulo que forman sus ejes principales. Esta clasificación es válida tanto para intersecciones como para enlaces.

Nudo en T.

Se trata de una vía secundaria que finaliza en la intersección con otra primaria. Puede tener distinto nivel de oblicuidad y de canalización de las trayectorias. Así mismo, puede tener algún cruce a distinto nivel.

Nudo en Y.

Es un nudo de tres ramales, en la que la oblicuidad es bastante grande. Según las "Recomendaciones para el proyecto de intersecciones" (Ministerio de Fomento, 1968), el límite entre una "T" y una "Y" es el ángulo de 60º.

Nudo en "+" o cruz.

Nudo de cuatro ramales, con un ángulo entre ejes cercano a 90º.

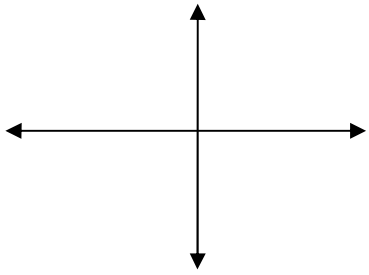


Figura 5-13. Esquema de nudo en cruz

Nudo en "x".

Nudo de cuatro ramales, con ángulo entre ejes de menos de 60º.

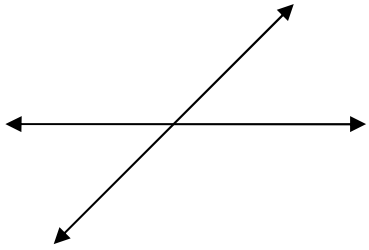


Figura 5-14. Esquema de nudo en "x"

5.7 Catálogo de nudos

En función del grado de canalización, de cómo se hayan materializado las diferentes trayectorias (giros directos, semidirectos, indirectos, etc.), y del ángulo entre las vías, obtenemos todo un repertorio de posibles nudos.

Los esquemas que a continuación se presentan están extraídos de "Ingeniería de Tráfico" (A. Valdés, 1970) y de "Ingeniería de Carreteras" (C. Kraemer y otros, 2003).

5.7.1 Intersecciones

A continuación se recogen algunos esquemas de intersecciones bastante usuales. No obstante, hay muchas más posibilidades con variaciones de estos esquemas.

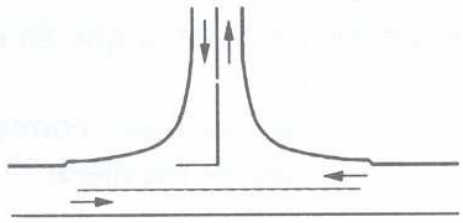


Figura 5-15. T sin canalización

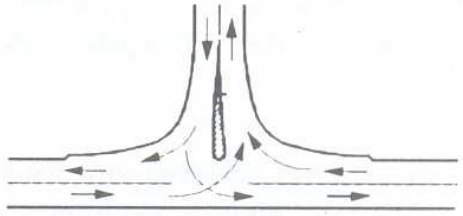


Figura 5-16. T canalizada con una lágrima en la carretera secundaria

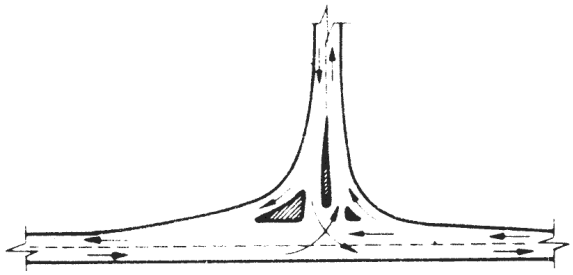


Figura 5-17. T con separación de giro a derechas desde la secundaria

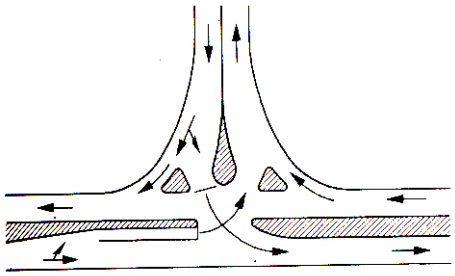


Figura 5-18. T con mediana en vía principal

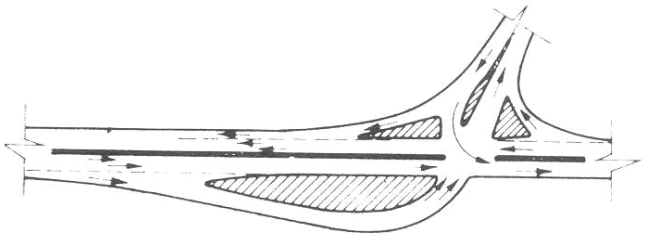


Figura 5-19. Y con separación de puntos de conflicto

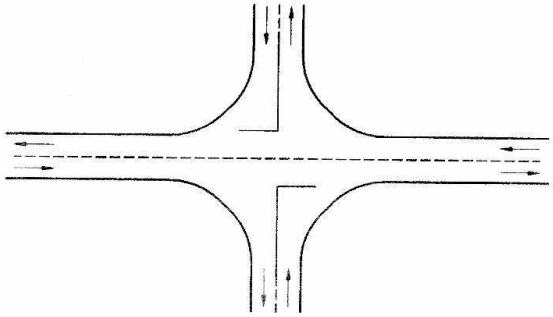


Figura 5-20. Cruz sin canalización

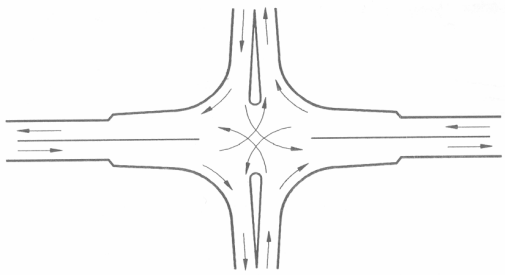


Figura 5-21. Cruz con poca canalización

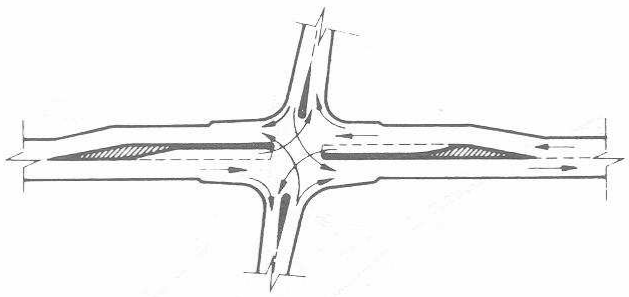


Figura 5-22. Cruz con carriles de giro a izquierda en la principal

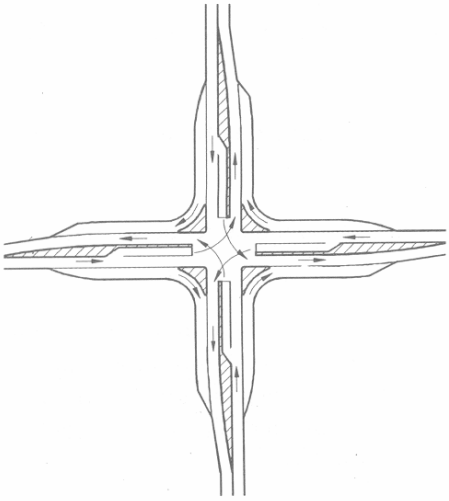


Figura 5-23. Cruz con total canalización

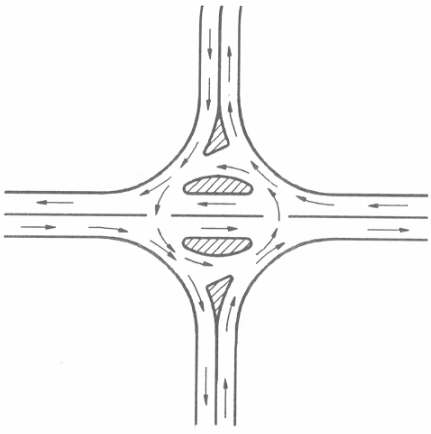


Figura 5-24. Cruz tipo glorieta partida

5.7.2 Enlaces

La variedad de posibles enlaces es enorme. Aquí se describen algunos tipos fundamentales, en los que la principal diferencia es la manera de realizar los giros a izquierda. Estos giros condicionan el número de cruces a distinto nivel (y de estructuras necesarias). La complicación de los enlaces y la base de las distintas variaciones en estos esquemas consiste en que un enlace puede tener algunos cruces a nivel. Por tanto, dentro de estos enlaces podemos descubrir intersecciones con o sin canalización, de diferentes tipos.

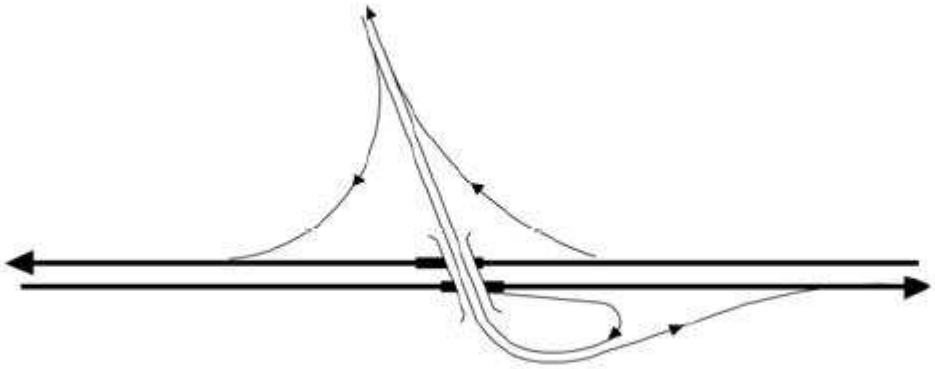


Figura 5-25. Enlace en trompeta

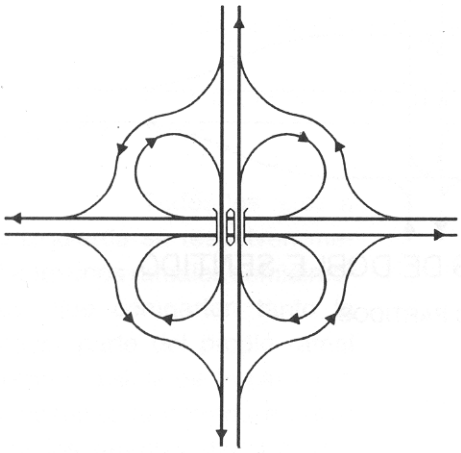


Figura 5-26. Trébol completo

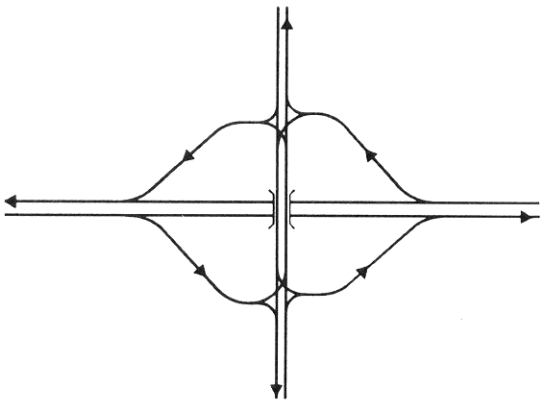


Figura 5-27. Diamantes

5.8 Cruces

5.8.1 Tipos

Dos trayectorias pueden cruzarse o intersecarse de varias maneras, según el ángulo de intersección.

En primer lugar, tenemos los **cruces perpendiculares**. En ellos, ambas trayectorias se cortan según un ángulo recto.

En segundo lugar, encontramos **cruces oblicuos**, que son el objetivo principal de este texto. En ellos, las trayectorias se cortan según un ángulo intermedio. Esto supone ciertos problemas e incomodidades al conductor sin prioridad de paso, que intenta realizar la maniobra de cruce.

También tenemos **cruces en disposición paralela**. En ellos, la trayectoria sin preferencia circula aproximadamente paralela a la trayectoria principal, hasta que realiza un giro y se produce el cruce. Los conductores sin preferencia que llegan al cruce, toman la decisión de realizar la maniobra cuando sus vehículos están prácticamente alineados con la vía que pretenden cruzar. Esta situación es característica de los carriles de almacenamiento central para giro a izquierda, en intersecciones canalizadas.

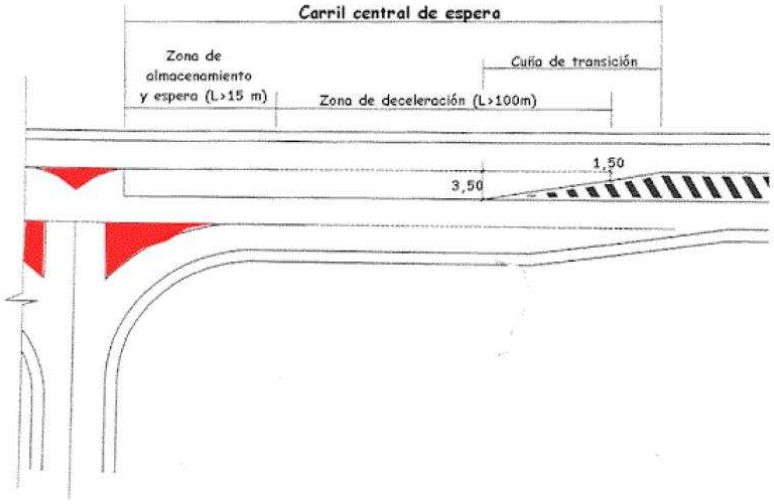


Figura 5-28. Carril central de giro a izquierda

Existen variaciones de los anteriores, en función de si las trayectorias son alineaciones rectas o curvas. En cada caso, lo importante es el ángulo que hay entre el vehículo que pretende realizar el cruce y la vía con preferencia, en el momento de la decisión. Ese ángulo es el que condiciona el comportamiento del conductor, y el origen de las complicaciones que podemos encontrar en estas disposiciones viarias.

5.8.2 Definición de oblicuidad de cruce

Como hemos visto los nudos se clasifican en "T" o "Y", en "+" o "X". Podemos **definir la oblicuidad de la intersección** como el ángulo que forman entre sí, las trayectorias del cruce.

Las trayectorias de los vehículos que se cruzan en la intersección, forman entre sí un determinado ángulo. Ese ángulo es el que determina la "oblicuidad" del cruce. Si el cruce tiene un ángulo de 90º diremos que no es oblicuo. Por el contrario, cuanto más alejado de 90º, más oblicuo.

Tenemos **dos tipos de oblicuidades: a derechas y a izquierdas**, según el ángulo sea inferior o mayor que 90º. Los problemas que se presentan en ellos son diferentes.

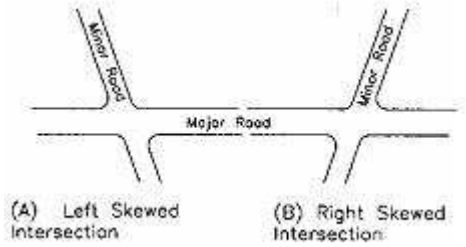


Figura 5-29. Oblicuidad a derechas y a izquierdas

5.8.3 Oblicuidad de cruce admisible

Según la normativa

Según el "principio de la perpendicularidad" citado en los criterios generales de diseño son recomendables las intersecciones en "+" y en "T" a las de tipo "Y" y "X". Es decir, **la oblicuidad de la intersección debe evitarse**.

Si se analizan la normativa y directrices internacionales acerca de cuáles son los ángulos óptimos a emplear en el diseño de intersecciones, existe una cierta unanimidad sobre que las intersecciones deberían tener un ángulo de 90 grados. Se analizarán unas cuantas directrices, comenzando por la española.

En **España**, las "Recomendaciones para el proyecto de intersecciones" (Ministerio de Fomento, 1968) se afirma que se consideran aceptables las intersecciones con ángulos comprendidos entre 60 y 120 grados.

Para **EEUU**, analizaremos el informe sobre diseño geométrico de la AASHTO "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets 2001" (también conocido como "Green Book"), en su edición de 2001. Para carreteras rurales locales y para urbanas locales y colectores rurales, se exige que el conductor tenga una visión no obstruida de toda la intersección y los ramales que acceden a ella de modo que se eviten colisiones y que los ramales que operen bajo el régimen de señales de "stop" se corten perpendicularmente donde sea posible, y como mínimo, que el ángulo de la intersección sea de 60 grados. También se exige, en intersecciones oblicuas, que exista algún control sobre ellas, ya sea mediante señales de "stop" u otros controles más rigurosos.

Comentaremos las exigencias realizadas por las **administraciones estatales de EEUU**. Así, en Alaska, Illinois, Wisconsin y California se considera deseable un ángulo mayor a 75 grados, y como mínimo 60 grados. En Colorado se consideran satisfactorias intersecciones con ángulos de 60 grados o más, e incluso se afirma que en tal de que no se rebase ese límite, no existe peligro, lo cual es discutible. En Minessota se recomiendan realineaciones para intersecciones con ángulos menores de 70 grados. En Ohio se recomiendan ángulos entre 70 y 90 grados, y se denominan aceptables de 50 grados y apropiados para casos excepcionales cuando el ángulo llega a 50 grados. En Nebraska se permiten en intersecciones menores ángulos de hasta 60 grados o mayores. Por último, en Idaho, se consideran apropiados ángulos mínimos de 70 grados, aunque sean deseables 75.

Por otra parte, en **Canadá**, la de la Asociación Canadiense del Transporte, exige que el ángulo de la intersección sea mayor a 70 grados.

Así, se ha hecho un repaso a varias directrices, en las que, en general, se proponen ángulos mayores de 60 o 70 grados, aunque se admiten ángulos menores en algunas circunstancias. Estas circunstancias especiales se refieren a intersecciones con poco tránsito o de escaso espacio para la realineación.

En Australia, la asociación Austroads publica unas guías para el diseño de carreteras, cuya parte dedicada a las intersecciones tiene por título: "Guide to Traffic Engineering Practice - Part 5: Intersections at Grade" (Austroads, 2005). En este texto comentan que cuando dos trayectorias han de cruzarse deben hacerlo siempre con ángulos entre 70º y 110º.

Según diversos textos

En "Intersection channelization design guide" (**Neuman** y otros, 1985), citan varios principios para que la canalización de los carriles de giro ofrezca operaciones satisfactorias para los conductores que las llevan a cabo. Uno de ellos se que las vías de la intersección deberían cruzarse en ángulos rectos o similares a estos. Se comenta en este texto que los ángulos de intersección deberían estar siempre entre 75 y 90 grados y cuando haya necesidades económicas u otras limitaciones importantes, se admitirían ángulos de 60 grados.

En la **Transportation Research Board** (1984) se afirma que el ángulo recomendado para el diseño de intersecciones es 90 grados.

El texto de la **Federal Highway Administration** "Manual on Uniform Traffic Control Devices" (2000), con el apoyo del "Institute of Transportation Engineers", recomienda que en intersecciones oblicuas donde el ángulo sea menor de 75 grados se prohíba realizar giros a derechas mientras el semáforo está en rojo, ya que eso puede provocar accidentes.

Gattis y Low (1997) redactan un informe muy interesante acerca de un experimento que analiza la visibilidad lateral en vehículos con caja (automóviles con la carrocería lateral y trasera opaca) y evalúa, basándose en sus resultados, cuáles pueden ser ángulos aceptables en intersecciones, según las limitaciones de estos vehículos. Así, estos autores, miden el ángulo de visibilidad a la derecha del conductor y una vez obtienen este dato, sitúan el campo de visión en una intersección oblicua para comprobar si se cumplen las exigencias de visibilidad de parada, como se puede ver en la Figura 5-30. De este modo se consigue información para saber, según las características de estos vehículos, cuáles son ángulos aceptables para las intersecciones. Tras todo este proceso, los autores recomiendan ángulos de 70 o 75 grados como mínimo para que estos automóviles no se encuentren en situaciones de peligro.

En el esquema que aparece en la Figura 5-30, los autores identifican *IA* como el ángulo de la intersección ("*intersection angle*"), *E* como la separación desde el conductor hasta la línea de fin de carril, *A* es el lado menor del triángulo de visibilidad en una disposición oblicua, mientras que *B* es la distancia de visibilidad necesaria, o bien la distancia de parada, según el caso. Los tres ángulos de este triángulo son: *IA, a, b*. El ángulo *VA* es el ángulo de visibilidad necesario por el conductor hacia su izquierda ("*visual angle*"). Gattis y Low centran su investigación en estudiar cuál es el valor máximo admisible para *VA*.

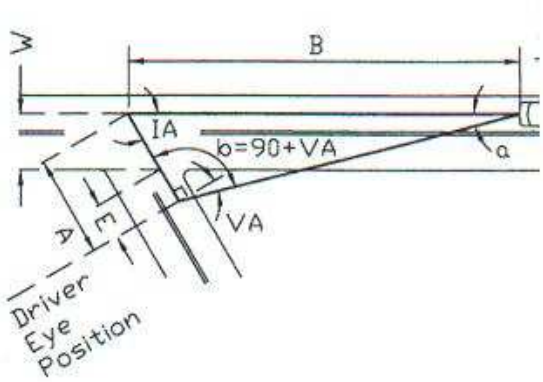


Figura 5-30. Triángulo de visibilidad propuesto por Gattis y Low

Son y otros (2002) realizan otro estudio en la línea del anterior de Gattis y Low (1997). Después de realizar un desarrollo teórico sobre el triángulo de visibilidad, obtienen la relación entre el ángulo *VA* y la distancia de visibilidad disponible *B*. Estos autores realizan un pequeño estudio experimental en el que miden los ángulos *VA* para 15 conductores diferentes, con diferentes tipos de vehículos, y en diferentes posturas. Aunque la muestra es extremadamente pequeña, los resultados tienen gran interés. Toman un percentil bajo del valor del ángulo de visión y con él calculan la visibilidad disponible, comparándola con la distancia de frenada correspondiente a diferentes velocidades. El resultado es que la visibilidad es insuficiente para cubrir la distancia de frenada en todos los casos con oblicuidades por debajo de 70º, para vehículos "con caja".

En este texto aparece una gráfica en la que se comprueba cómo al aumentar la oblicuidad la visibilidad se reduce drásticamente (Figura 5-31). Las líneas VA_{SB} VA_{CP} VA_{LF} corresponden a la distancia de visibilidad disponible en función de la postura: sentada hacia atrás, confortable o hacia delante ("sit-back", "comfortable position" o "lean-forward"). Por ejemplo, con 65º de oblicuidad, un conductor en posición "confortable" (CP) tiene una visibilidad de unos 75m. Pero la distancia de frenada, si la velocidad de cálculo es 90km/h, es de 160m (mucho mayor). No obstante, si la oblicuidad fuera de 70º, la situación cambia totalmente.

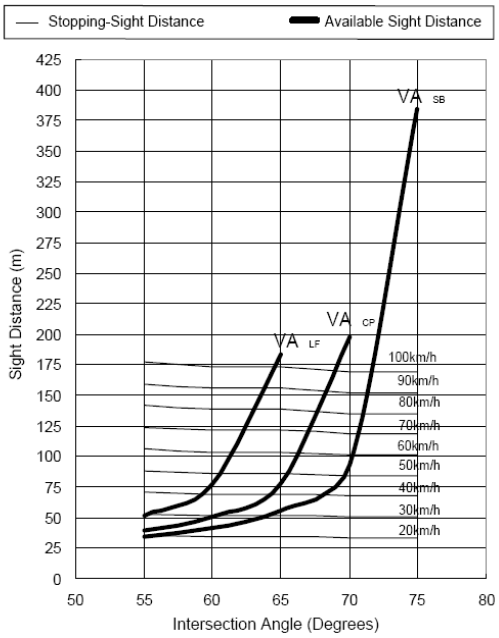


Figura 5-31. Reducción de la visibilidad en función de la oblicuidad, para turismos, según Son-Young-Tae y otros (2002)

Para finalizar con éste tema, **McCoy** y otros (1994) opinan, que el ángulo mínimo de intersección aceptable debe ser función del volumen del tráfico y la economía, es decir, del coste de la realineación, implantación de métodos de control como semaforización, retrasos sufridos por los conductores, mayor consumo de carburante, etc. Así, los autores afirman que se debe fijar un mínimo de 60 grados para vías con gran volumen de tráfico, mientras que, en vías menores se puede rebajar esta exigencia.

En este apartado se ha dado un repaso a investigaciones enfocadas a descubrir cuál es el ángulo óptimo en intersecciones. Queda claro que **el ángulo óptimo es de 90 grados**, **pero se pueden aceptar ángulos de hasta 70 grados** e incluso inferiores según las circunstancias, apoyando, por tanto, las indicaciones de las directrices comentadas.

5.9 Incorporaciones

5.9.1 Tipos

La **oblicuidad** del cruce es la que más se trata en las diferentes normativas y textos sobre el tema. Sin embargo, sobre las incorporaciones, muy pocas referencias podemos encontrar.

Hay distintos **tipos de incorporaciones** que podemos considerar. En todas ellas encontramos una convergencia entre dos trayectorias, pero el diseño de la vía condiciona la situación. Se trata de fenómenos diferentes, que, aunque relacionados, exigen modelos explicativos diferentes.

En una vía con dos o más carriles para el mismo sentido, los vehículos tienen cierta libertad para circular por el carril que deseen. Esto origina maniobras de **cambio de carril**. En ellas no cabe hablar de oblicuidad, puesto que ambos carriles pertenecen a la misma vía y son paralelos. No obstante, este tipo de maniobras también entrañan cierto peligro. Alrededor del vehículo existe una zona denominada "ángulo muerto", de la que se hablará en profundidad más adelante. Por el momento, es suficiente con saber que es una zona que el conductor no cubre con su visión directa ni a través de los retrovisores. Existe el peligro de que un vehículo pequeño quede dentro de dicha zona, pasando desapercibido por el conductor. Esto puede dar lugar a que el conductor decida iniciar la maniobra de cambio de carril cuando, en realidad, no hay la suficiente distancia de seguridad con el vehículo más próximo en ese carril.

Las **confluencias** son lugares en los que dos vías que circulan paralelas, se fusionan en una sola, pero sin pérdida de carriles. En estos puntos no se exige del conductor ningún tipo de maniobra. Pero sí que la habrá después de la confluencia. Hay un tramo de reajuste, en el que los vehículos lentos pasan al carril derecho (si no estaban en él) y los rápidos pasan al izquierdo. Hay pues, un trenzado de cambios de carril, y como se trata de cambios de carril, tampoco hay oblicuidad que estudiar.

Las **incorporaciones mediante carril de aceleración**, son típicas de las autopistas (Figura 5-32). En ellas el vehículo que pretende incorporarse dispone de un tramo de circulación paralela, en el que va adquiriendo velocidad, y observando el tráfico. Tras un tiempo, encuentra un hueco aceptable y se introduce en la vía principal. En estas incorporaciones no cabe hablar de oblicuidad, pues, como puede verse, el carril de incorporación discurre paralelo a la vía principal en longitud suficiente para hacer la maniobra.

Las **incorporaciones en cuña** son las que presentan una oblicuidad que hay que estudiar (Figura 5-33). Estas incorporaciones aparecen en todo tipo de nudos. Se trata de un ramal de incorporación que desemboca en la vía principal terminando en forma de cuña o triángulo. Al ángulo de la cuña le denominaremos oblicuidad de la incorporación.

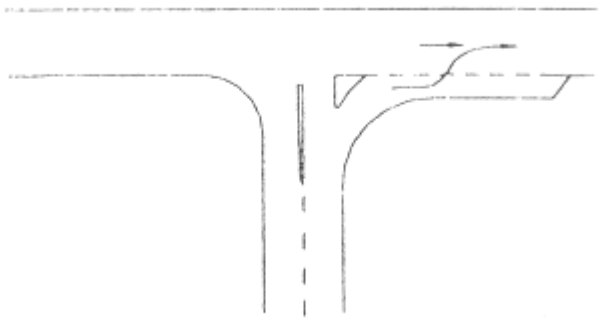


Figura 5-32. Intersección con giro a derechas mediante carril de aceleración

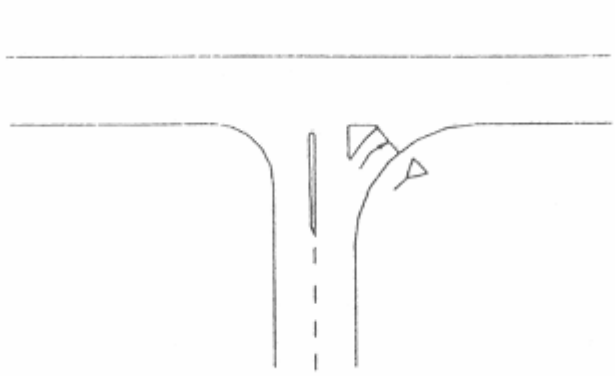


Figura 5-33. Intersección con giro a derechas mediante cuña de entrada

5.9.2 Incorporaciones mediante carril de aceleración

Descripción del fenómeno

Las incorporaciones mediante carril de aceleración, son típicas de las autopistas. En ellas el vehículo que pretende incorporarse dispone de un tramo de **circulación paralela,** en el que va adquiriendo velocidad, y observando el tráfico. Tras un tiempo, encuentra un hueco aceptable y se introduce en la vía principal. A estos carriles también se les denomina carriles de cambio de velocidad, carriles de aceleración, carriles de incorporación o entrada**.**

Tipos

Hay dos tipos de carriles de incorporación, en función del diseño del mismo. En la Figura 5-34 se pueden ver ejemplos de estas clases de carriles de cambio de velocidad. En la parte superior se puede ver un carril de cambio de velocidad de entrada paralelo y en la inferior uno directo. En los apartados posteriores se discutirá cuándo utilizar los directos o los paralelos, sus ventajas y sus inconvenientes.

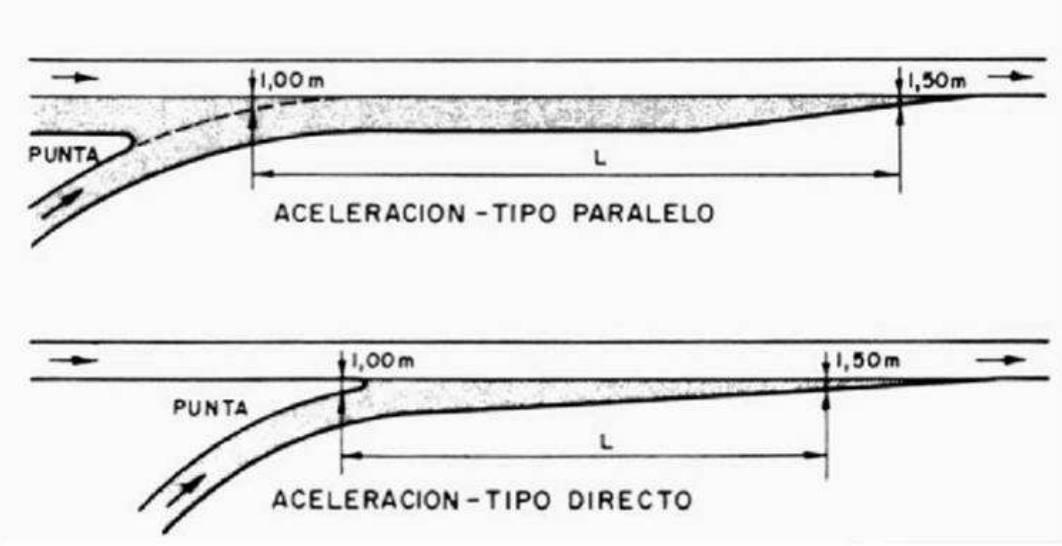


Figura 5-34. Tipos de carriles de aceleración

Así, la Instrucción 3.1-IC (1999), describe estos dos tipos de carriles de cambio de velocidad:

"**Paralelo**, en el que el carril de cambio de velocidad, adosado a la calzada principal, incorpora una transición de anchura variable linealmente en el extremo contiguo a dicha calzada".

"**Directo**, en el que el carril de cambio de velocidad es tangente al borde de la calzada principal o forma con él un ángulo muy pequeño".

Necesidad

La Norma 3.1 I.C. "Trazado" (Ministerio de Fomento, 1999) indica que los carriles de cambio de velocidad de aceleración y deceleración, independientemente de la existencia o no de carriles adicionales, deben proyectarse en los siguientes casos:

- Entradas y salidas de carreteras de calzadas separadas, vías rápidas y carreteras convencionales de clase C- 100 y C-80.
- Entradas y salidas de carreteras de clase C-60 que tengan una IMD superior a mil quinientos (1500).
- En cualquier otro caso previa justificación.

Visibilidad

Neira (1999) en su estudio de los carriles de aceleración, llama la atención hacia la visibilidad necesaria por parte de los conductores que ya se hallan en la vía principal, los cuales deben vigilar si existen vehículos acercándose a ellos a través de los carriles de aceleración. En estos casos, no importa tanto el diseño del automóvil o de la carretera, sino más bien el **despeje en la punta del carril de aceleración.** Esta situación se puede comprobar en la Figura 5-35**.**

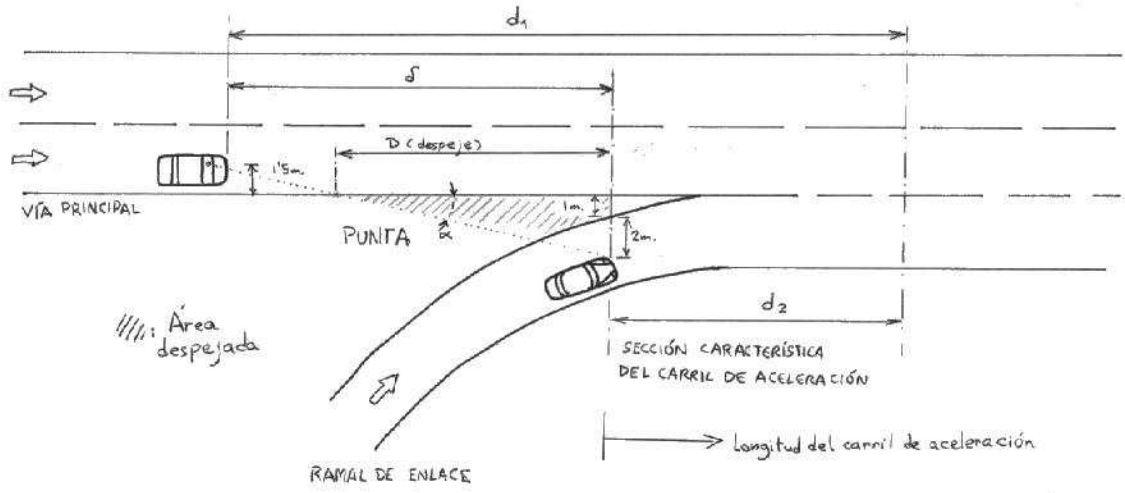


Figura 5-35. Croquis del área de despeje en la punta de la incorporación

En esta zona se suelen instalar elementos decorativos o vegetación, lo cual es muy adecuado estéticamente, pero se debe vigilar que, dada la altura de estos tratamientos, estos no obstruyan la visibilidad de los usuarios de las infraestructuras. Así, se debe dejar en esta zona el despeje necesario como para que el conductor de la vía principal pueda reaccionar al ver al otro automóvil que se está incorporando y realice alguna maniobra con las precauciones adecuadas, de cara a evitar a dicho automóvil.

Tipo de carril de aceleración más adecuado

Como comenta Koepke (1993) en su estudio de los carriles paralelos y directos, una encuesta realizada entre los Departamentos de Transporte de los estados de EEUU indica que una parte utiliza sólo carriles paralelos, otros sólo directos y algunos los dos a la vez. Sin embargo, es significativo que el 91 % de ellos prefirieron un diseño directo para los carriles de salida y el 75 % prefirieron un diseño paralelo para los carriles de entrada.

Según el autor citado, los carriles directos en salidas son favorables al comportamiento natural del conductor. Si se analizan las trayectorias que describen estos en los carriles de cambio de velocidad, el diseño directo se ajusta mejor a éstas, ya que suelen ser progresivas y con un pequeño ángulo. Sin embargo, en carriles de entrada, este tipo exige al conductor que compatibilice las acciones de acelerar, buscar un hueco en el tráfico y manejar el volante en la incorporación.

Los carriles paralelos originan una maniobra de curva y contracurva, es decir, una "S" para pasar de un carril a otro. Esta maniobra resulta un poco forzada y lejana del comportamiento habitual de los conductores, con lo que parte de la zona asfaltada queda infrautilizada. Pero, por otra parte, estos carriles proporcionan al conductor una mejor visión del carril adyacente, al cual desean incorporarse, favoreciendo la adecuada incorporación al tráfico existente. Además, el conductor, mientras transita a lo largo de ese carril paralelo, puede elegir el momento en que se incorpora al carril adyacente, aumentando por lo tanto sus posibilidades de incorporación sin llegar a detenerse.

Tras estas consideraciones, la bibliografía no está de acuerdo en cuáles son las elecciones adecuadas, así que hay opiniones enfrentadas. La norma española establece que los carriles de deceleración deben ser de tipo paralelo para evitar colisiones traseras en vehículos que realicen la transición de velocidad en el propio carril de la vía principal, aunque con la justificación adecuada, pueden adoptarse diseños directos, mientras que los carriles de aceleración deben ser siempre paralelos. Por otra parte, la AASHTO (2001) admite que ambas opciones son adecuadas si se diseñan correctamente, aunque aconseja los carriles directos tanto para aceleración como para deceleración. La norma técnica italiana CNR Nº 90 (1983) considera exclusivamente carriles de tipo paralelo, y, como afirma Luís Neira en su estudio: "en países como el Reino Unido, Dinamarca o Japón parece que se prefiere el tipo directo, pero en general en todas las redes coexisten carriles de ambos tipos".

5.9.3 Incorporaciones mediante cuña

Descripción

Las cuñas aparecen en todo tipo de nudos. Son ramales que parten de una vía secundaria y desembocan en la vía principal precedidos de un "stop" o de un "ceda el paso", según la situación. En general, en el tramo final de la incorporación, guardan un cierto ángulo respecto de la vía principal, lo que las caracteriza. A ese ángulo le denominaremos **oblicuidad de la incorporación.**

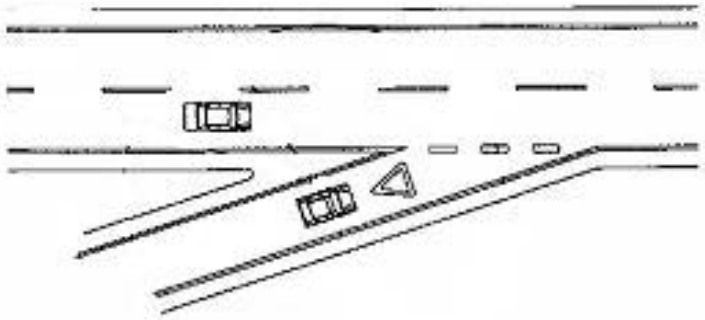


Figura 5-36. Esquema de una incorporación oblicua sencilla

Podríamos describir el **comportamiento del conductor** en este tipo de incorporaciones de la siguiente manera: el conductor que circula por la vía de incorporación va reduciendo su velocidad, conforme se acerca al final del carril. Según se trate de un "stop" o de un "ceda", el conductor (idealmente) se comporta de manera distinta. Si se trata de un "stop", parará a poca distancia del final del carril, y desde allí examinará la situación. En ese punto decidirá cuándo es el momento apropiado para iniciar su maniobra, en función de los huecos del tráfico principal. Si se trata de un "ceda", el conductor debe tomar esa decisión al tiempo que no deja de avanzar por el carril. Si hay hueco, no llega a frenar, sino que continúa su camino, realizando la maniobra de incorporación. Si no hay hueco, entonces tiene que parar el vehículo y esperar un hueco adecuado. Esta última fase es similar a la del conductor que realizar el "stop".

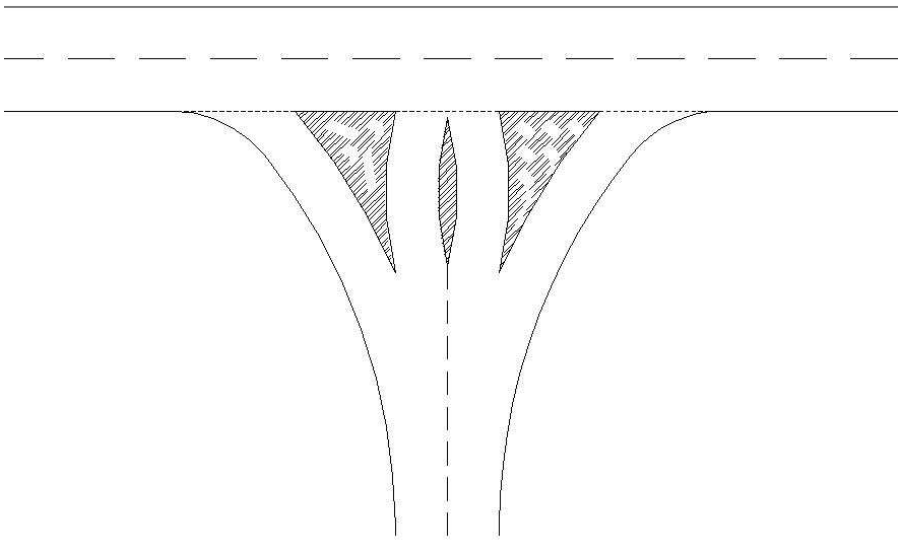


Figura 5-37. Intersección canalizada con cuña de incorporación

Diseño según normativa española

Según la Norma 3.1 I-C (Ministerio de Fomento, 1999), estas tendrán una longitud de treinta metros (30 m), medida entre la sección en que la separación entre bordes de calzada de la cuña y calzada principal sea de un metro y medio (1,5 m), medida perpendicularmente al eje de ésta, y el final de la misma, como se puede ver en la Figura 5-38.

Se está pidiendo, pues, que en los últimos 30 m, el ángulo secante entre el ramal de incorporación y la vía principal, tenga una cotangente de 30 / 1,5 = 45. Es decir, un ángulo de 1,273º, que es muy bajo.

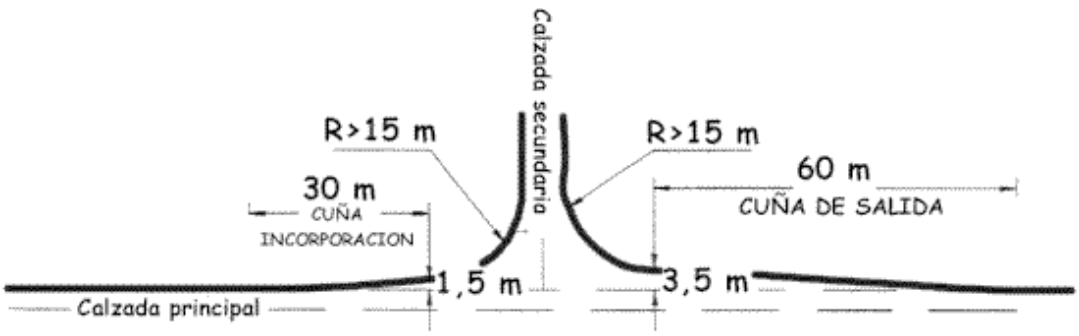


Figura 5-38. Esquema de las cuñas de incorporación

Las "Recomendaciones para el diseño de intersecciones" (Ministerio de Fomento, 1968) indican que el tráfico que se incorpora o sale de una vía debe hacerlo con ángulos de incidencia pequeños, del orden de 10 a 15 grados para aumentar la fluidez de la circulación. Si estos ángulos son mayores, los vehículos se verán obligados en muchos casos a detenerse, con la consiguiente disminución de capacidad y seguridad de la intersección, y que si el tráfico es importante, es aconsejable emplear vías de aceleración o deceleración.

Estas mismas "Recomendaciones" especifican mucho más que la "Instrucción de Trazado 3.1-IC" (Ministerio de Fomento, 1999) el diseño de las incorporaciones: diferencia intersecciones sin canalizar de intersecciones canalizadas.

Para las intersecciones sin canalizar, propone dos formas diferentes de diseño. Donde la "Instrucción 3.1-IC" sólo indica un radio mayor que 15m, las "Recomendaciones" especifican diferentes radios para cada situación posible. El borde interior de la zona pavimentada (curva), puede diseñarse según una única alineación curva, tangente a las alineaciones rectas cercanas, o mediante una curva de tres centros.

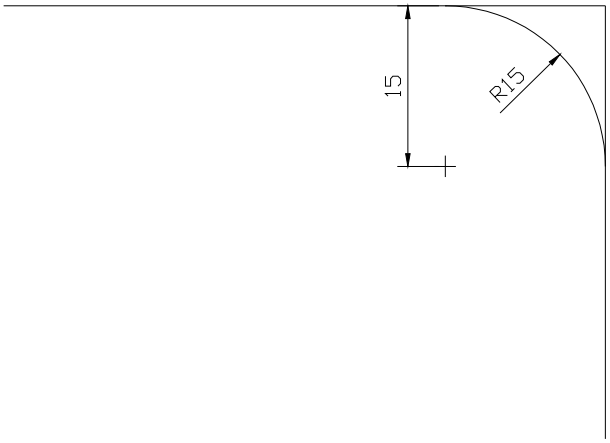


Figura 5-39. Diseño con una curva de radio constante

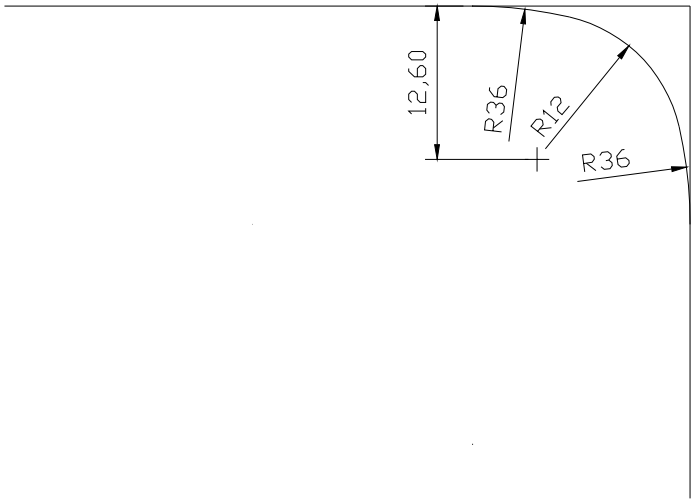


Figura 5-40. Diseño con una curva de 3 centros

Si aplicamos el concepto de cuña de incorporación que prescribe la "Instrucción 3.1-IC", tendríamos que prologar la parte final de la incorporación, desde que el carril tiene menos de 1,50 m, durante una distancia de 30 m. El resultado se muestra en la Figura 5-41.

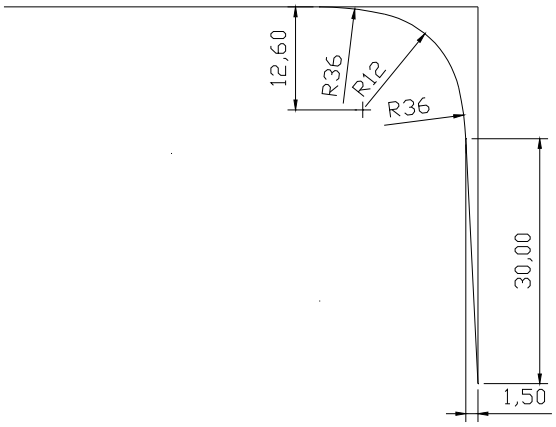


Figura 5-41. Diseño con cuña de cotangente 45

Este diseño se considera adecuado para que el vehículo correspondiente pueda girar a 15 km/h (o menos), sin desplazarse lateralmente de su carril de circulación, tanto a la entrada como a la salida de la maniobra, y permaneciendo las ruedas interiores como mínimo a 0,30 m del borde del pavimento. Se comenta en este texto que este diseño se acopla aproximadamente a la trayectoria seguida en su maniobra por vehículos comerciales normales.

Se indican en una tabla las correcciones a este diseño para adecuarlo a otras situaciones (Tabla 5-1).

Vehículo tipo	Ángulo de inters. (gonios)	Curva sencilla	Curva de tres centros			
		Radio (m)	R1 (m)	R2 (m)	R3 (m)	Retranq. (m)
L	30	18				
C		30				
VA		60				
L	50	15				
C		22.50				
VA		45	60	30	60	0.90
L	65	12				
C		18				
VA			60	22.5	60	1.05
L	85	10.50	30	7.5	30	0.60
C		16.50	36	13.5	36	0.60
VA			45	15	45	1.65
L	100	9	30	6	30	0.75
C (*)		15	36	12	36	0.60
VA			45	15	45	1.50
L	115		30	6	30	0.75
C			30	10.5	30	0.90
VA			45	12	45	1.95
L	130		30	6	30	0.60
C			30	9	30	1.50
VA			36	10.5	36	2.10
L	150		30	6	30	0.45
C (*)			30	9	30	1.50
VA			36	9	36	2.40
L	165		22.5	5.4	22.5	0.60
C			30	9	30	1.50
VA			36	9	36	2.25
L	200		15	4.5	15	1.50
C			30	9	30	1.50
VA			36	7.5	36	3.30

(*) Este caso aparece en la figura

Tabla 5-1. Acuerdos circulares propuestos por el Ministerio de Fomento (1968)

El diseño puede ajustarse a distintos tipos de vehículos:

- L: ligero, turismos;
- C: comercial, camiones y furgonetas;
- VA: vehículo articulado.

Cuando el diseño se hace para vehículos tipo "C", debe justificarse que los vehículos articulados tengan que ocupar parcialmente los carriles adyacentes. No obstante, dicho diseño es el recomendado. Sólo admite diseño para vehículos ligeros en carreteras secundarias con poco tráfico.

El diseño también se ajusta en función del ángulo de la intersección, es decir, de la oblicuidad (el ángulo que forman entre sí las dos vías).

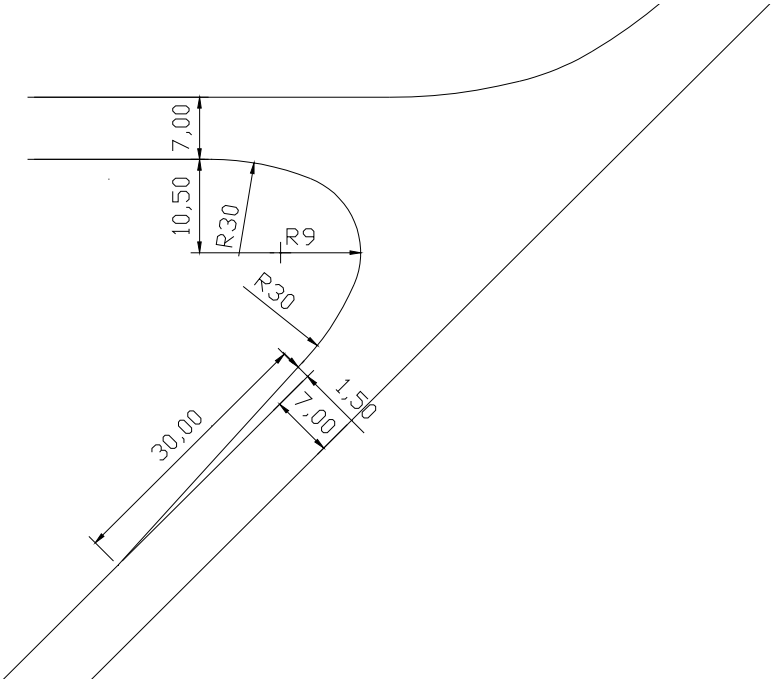


Figura 5-42. Intersección sin canalizar con cuña, oblicua a 150g

Cuando se proyecta para que los vehículos circulen por el ramal de incorporación a más de 25 km/h, entonces los radios de giro deben ser mayores, y la zona pavimentada es excesiva. Por tanto, es necesario reducir dicha zona realizando canalizaciones: introduciendo **isletas que canalizan los movimientos más importantes.**

Para diseñar un ramal, es necesario conocer los radios de curvatura del borde interior y el ancho mínimo del ramal. Estos datos básicos se muestran en la Tabla 5-2.

Vehículo tipo	Ángulo de giro (gonios)	Curva de tres centros				Ancho del ramal (m)	Tamaño de la isleta (m2)
		R1 (m)	R2 (m)	R3 (m)	Retranq. (m)		
L	85	45	22.5	45	1.05	4.20	5.50
C		45	22.5	45	1.50	4.80	4.50
VA		54	27	54	1.05	5.40	4.50
L	100	45	15	45	0.90	4.20	4.50
C (*)		45	15	45	1.50	4.80	10.00
VA		54	19.5	54	1.35	5.40	19.50
L	115	36	12	36	0.60	4.50	6.50
C		36	12	36	1.35	6.00	5.50
VA		45	12	45	2.25	7.80	4.50
L	130	30	9	30	0.75	4.80	11.00
C		30	9	30	1.50	7.20	6.50
VA		36	10.5	36	2.10	8.40	14.00
L	150	30	9	30	0.75	4.80	43.00
C (**)		30	9	30	1.50	7.80	34.50
VA		36	9	36	2.40	8.40	46.50
L	165	30	9	30	0.75	4.80	130.00
C		30	9	30	1.50	8.40	116.00
VA		36	9	36	2.25	9.60	139.00

(*) Este caso aparece en la Figura 5-43

(**) Este caso aparece en la Figura 5-44

Tabla 5-2. Acuerdos circulares con isleta propuestos por el Ministerio de Fomento

A continuación, se describen ejemplos de estas canalizaciones (Figura 5-43 y Figura 5-44). Nada se dice de la curva del borde exterior, pero aquí se han puesto valores razonables para los radios de curvatura.

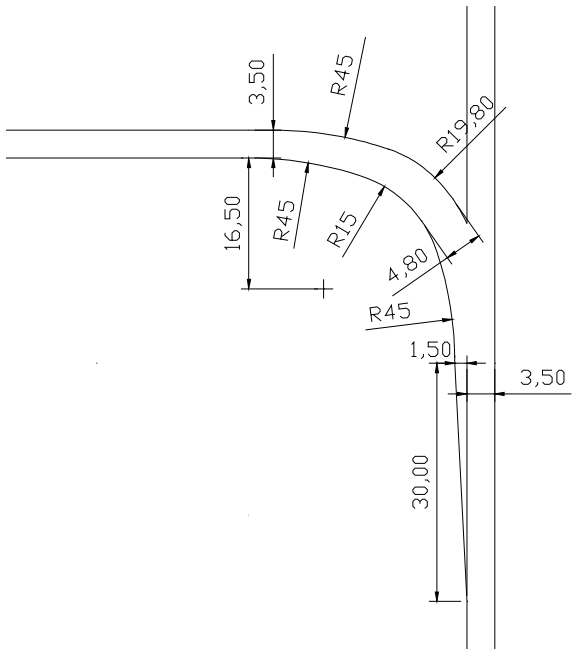


Figura 5-43. Ramal de incorporación con giro de 100g

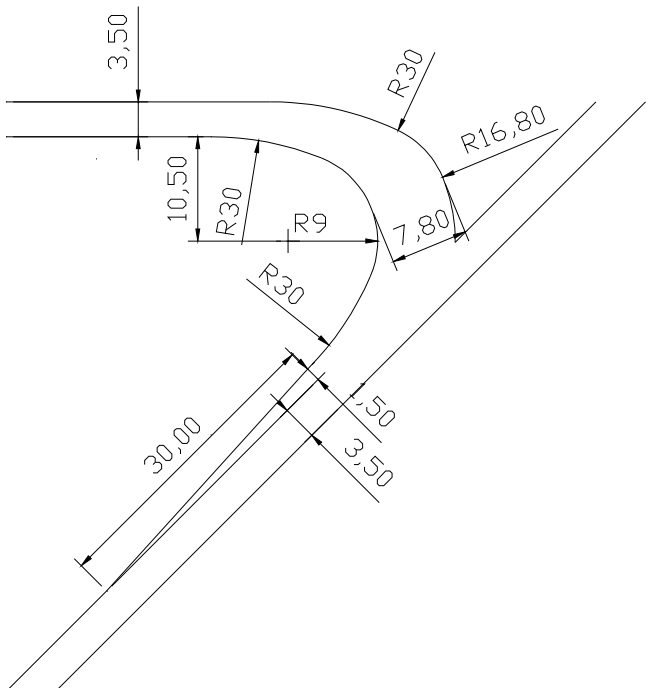


Figura 5-44. Ramal de incorporación con giro de 150g

La "Instrucción 3.1-IC" (Ministerio de Fomento, 1999) es una norma de obligado cumplimiento, mientras que las "Recomendaciones para el diseño de intersecciones" (Ministerio de Fomento, 1968), son sólo eso, unas recomendaciones o guías. Puesto que estas recomendaciones son algo antiguas, parece que es necesaria una revisión de las mismas, para adecuarlas a la actual situación de las carreteras españolas y a la normativa existente.

Podemos encontrar inadecuación entre la instrucción y las recomendaciones, en el radio de curvatura del borde del pavimento. En las recomendaciones aparecen múltiples casos con radios menores de 15m, no admisibles según la instrucción vigente.

Diseño según normativa estadounidense

En **Estados Unidos**, el texto de referencia es "**A policy on geometric design of highways and streets**" (AASHTO, 2001). En él se indican unas recomendaciones para el diseño de intersecciones, canalizadas o no. Especialmente, se indican valores para el trazado del borde interior de la curva de giro a derechas e incorporación.

El diseño propuesto es muy similar a las recomendaciones del Ministerio de Fomento comentadas anteriormente. En realidad, la normativa española toma muchas veces como base los textos correspondientes de los Estados Unidos.

La transición entre el ramal de incorporación y la vía principal puede realizarse de varias maneras. La más simple de todas ellas es con un acuerdo circular tangente a las alineaciones de ambas vías. Para conseguir una transición más gradual de curvaturas, se propone otra forma en la que la transición se completa con una curva de 3 centros. Por último, también indican una forma intermedia, en la que las curvas de mayor radio son sustituidas por rectas secantes, denominadas achaflanamientos (*tapers*).

Para cada tipo de solución, se proporcionan valores geométricos que permiten definirla con exactitud. Estos valores varían en función del vehículo tipo considerado en el diseño.

En realidad, estos valores se han calculado en función del espacio necesario para que estos vehículos giren. Como sabemos, los vehículos necesitan de un sobreancho en las curvas, puesto que las ruedas traseras no siguen la misma trayectoria que las delanteras. Este efecto es mucho más patente cuanto más largo es el vehículo considerado. Pues bien, los valores que este texto proporciona corresponden a los mínimos que permiten que los vehículos giren, sin salirse de la calzada. Es decir, **los mínimos que hacen que la trazada de todas las ruedas quede dentro del carril. En ningún caso se comenta que estos valores se hayan diseñado teniendo en cuenta la visibilidad del conductor.**

A continuación se incluyen estos valores propuestos para los principales tipos de vehículos, y diferentes ángulos de oblicuidad (Tabla 5-3). Las dimensiones de la tabla están todas en metros. La variable *retr* se refiere al retranqueo del centro de la curva, también en metros. Los tipos de vehículo mostrados son: "P" (*passenger*), turismo; "SU" (*single-unit truck*), camión no articulado; y "WB-15" (*Wheel base 15 m*), camión articulado con distancia entre ejes de 15 m .

Ángulo de giro (grados)	Vehículo	Curva simple	Curva y achaflanamientos			Curva de 3 centros			
		Radio	Radio	Retr.	Chaflán	R1	R2	R3	Retr.
45	P	15							
	SU	23							
	WB-15	53	36	0.6	15:1	60	30	60	1.0
60	P	12							
	SU	18							
	WB-15	45	29	1.0	15:1	60	23	60	1.7
75	P	11	8	0.6	10:1	30	8	30	0.6
	SU	17	14	0.6	10:1	36	14	36	0.6
	WB-15		20	1.0	15:1	45	15	45	2.0
90	P	9	6	0.8	10:1	30	6	30	0.8
	SU	15	12	0.6	10:1	36	12	36	0.6
	WB-15		18	1.2	15:1	55	18	55	2.0
105	P		6	0.8		30	6	30	0.8
	SU		11	1.0		30	11	30	1.0
	WB-15		17	1.2	15:1	55	14	55	2.5
120	P		6	0.6		30	6	30	0.6
	SU		9	1.0		30	9	30	1.0
	WB-15		14	1.2	15:1	55	12	55	2.6
135	P		6	0.5	10:1	30	6	30	0.5
	SU		9	1.2	10:1	30	9	30	1.2
	WB-15		12	2.0	15:1	48	11	48	2.7

(*) Las dimensiones de la tabla están todas en m.

Tabla 5-3. Valores para el diseño de intersecciones no canalizadas, según la AASHTO

A continuación, en la Figura 5-45, para ilustrar la Tabla 5-3, se muestra un ejemplo, correspondiente al diseño según el vehículo tipo "P" (*passenger*), para las 3 alternativas descritas.

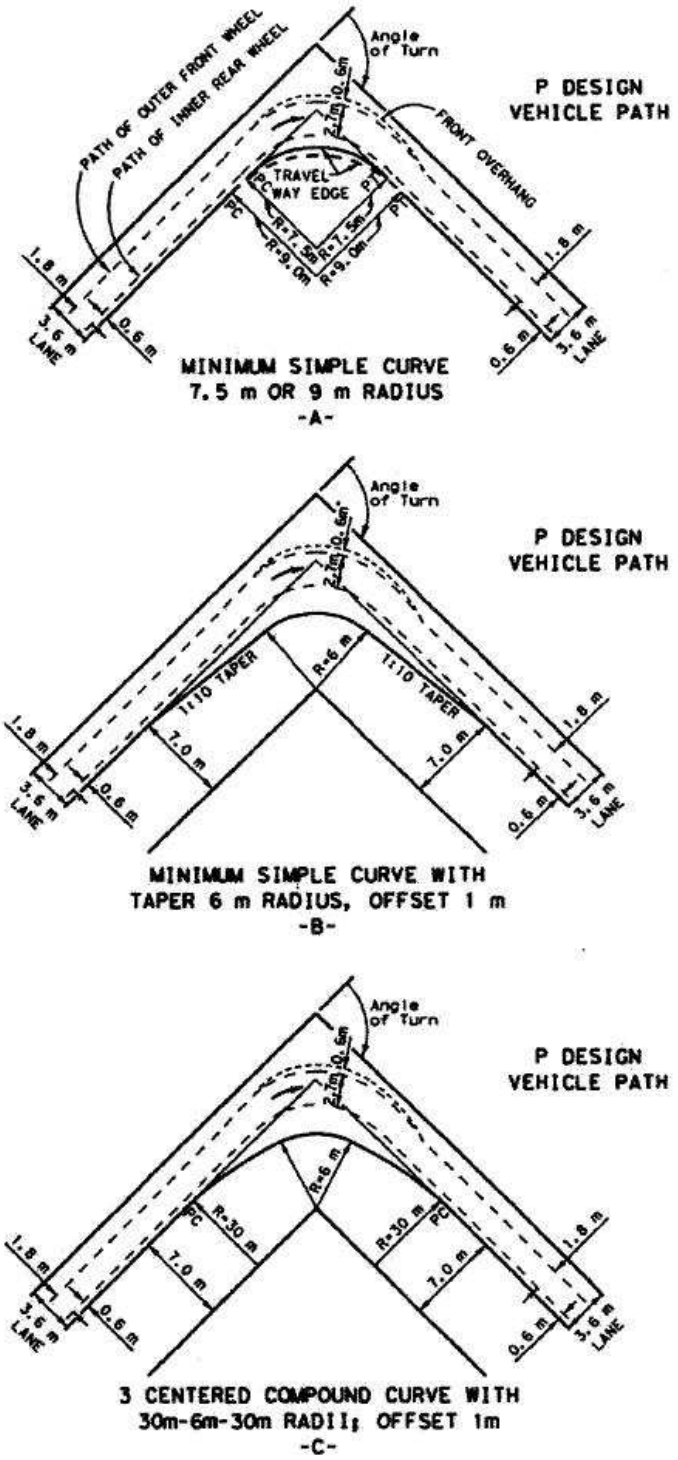


Figura 5-45. Diseño de giro a derechas de 90º, según la AASHTO

Análogamente, este texto proporciona valores para el diseño de giros a derecha e incorporaciones en intersecciones canalizadas, que se muestran en la Tabla 5-4.

Ángulo de giro (grados)	Vehículo	Curva de 3 centros				Ancho de carril	Tamaño de la isleta (m2)
		R1	R2	R3	Retranq.		
75	P	45	23	45	1.0	4.2	5.5
	SU	45	23	45	1.5	5.4	5.0
	WB-15	55	28	55	1.0	6.0	5.0
90	P	45	15	45	1.0	4.2	5.0
	SU	45	15	45	1.5	5.4	7.5
	WB-15	55	20	55	2.0	6.0	11.5
105	P	36	12	36	0.6	4.5	6.5
	SU	30	11	30	1.5	6.6	5.0
	WB-15	55	14	55	2.4	9.0	5.5
120	P	30	9	30	0.8	4.8	11.0
	SU	30	9	30	1.5	7.2	8.5
	WB-15	55	12	55	2.5	10.2	20.0
135	P	30	9	30	0.8	4.8	43.0
	SU	30	9	30	1.5	7.8	35.0
	WB-15	48	11	48	2.7	10.5	60.0
150	P	30	9	30	0.8	4.8	130.0
	SU	30	9	30	2.0	9.0	110.0
	WB-15	48	11	48	2.1	11.4	160.0

(*) Las dimensiones están todas en m.

Tabla 5-4. Valores para el diseño de intersecciones canalizadas, según la AASHTO

Para ilustrar la Tabla 5-4, a continuación se muestra gráficamente el diseño para un giro de 90º, para cada uno de los vehículos tipo (Figura 5-46).

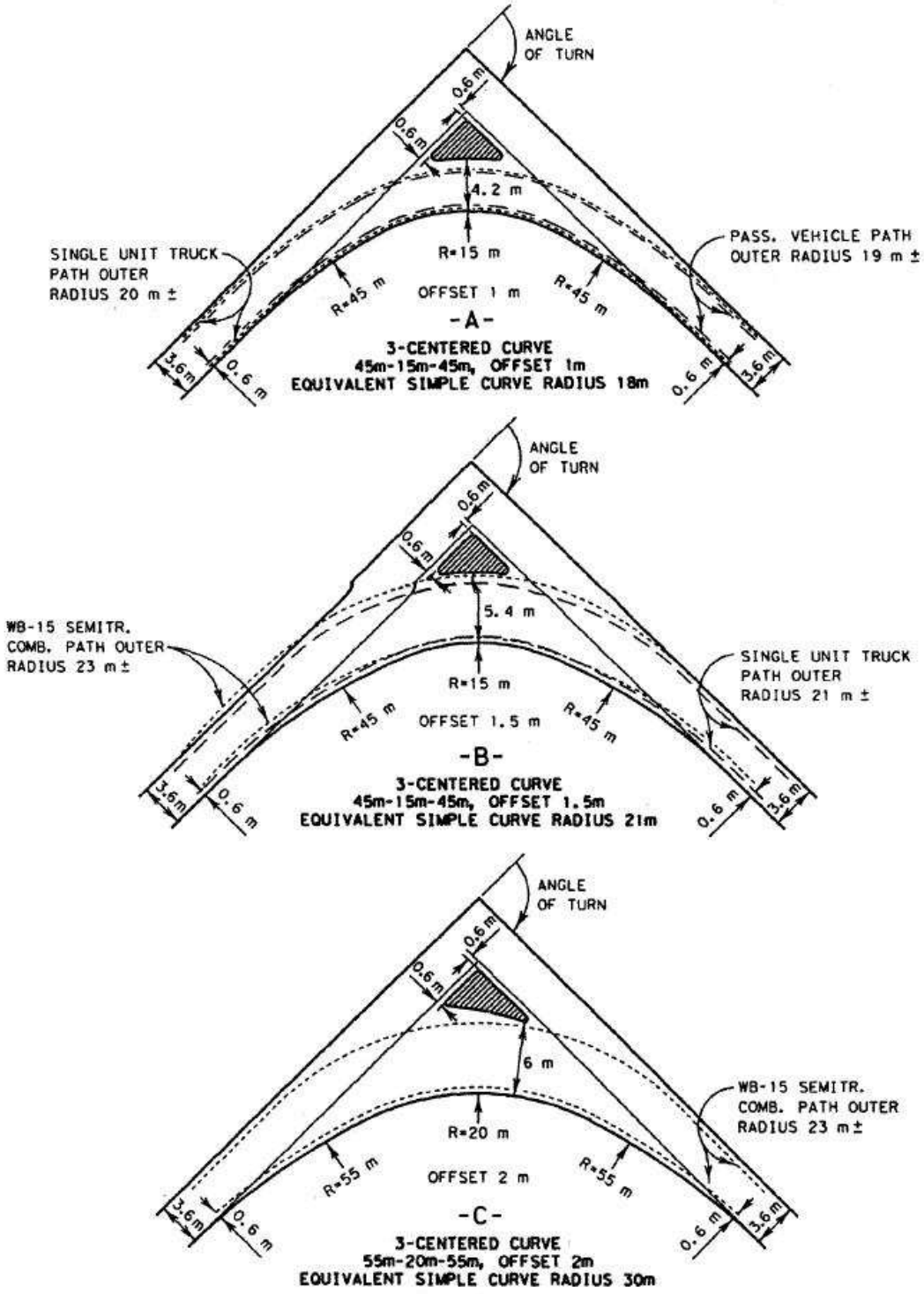
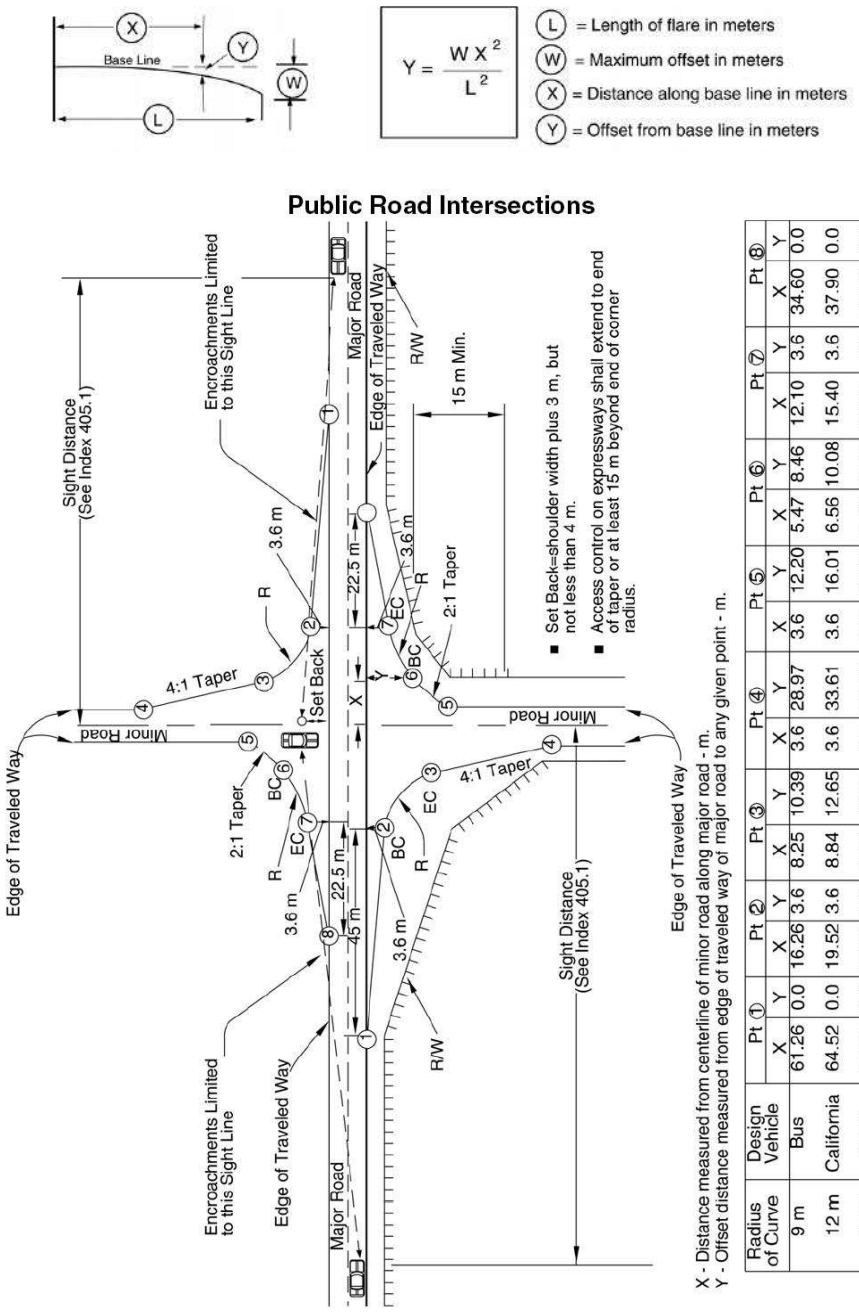


Figura 5-46. Diseño de giro a derechas, canalizado, de 90º, según la AASHTO

El **California Department of Transport** en su "Design Manual" especifica el siguiente tipo de intersección no canalizada en vías interurbanas. En él se ve que usan un acuerdo con una curva única de 1 centro, con dos acuerdos de transición. El acuerdo desde la curva hacia la vía secundaria es un achaflanamiento de 1:2 para el giro a derechas desde la vía secundaria y de 1:4 para el giro a derechas de la vía principal. El acuerdo desde la curva a la vía principal es una parábola. Este elemento parabólico es la principal diferencia respecto a los textos que se han comentado anteriormente.



Radius of Curve	Design Vehicle	Pt ①		Pt ②		Pt ③		Pt ④		Pt ⑤		Pt ⑥		Pt ⑦		Pt ⑧	
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
9 m	Bus	61.26	0.0	16.26	3.6	8.25	10.39	3.6	28.97	3.6	12.20	5.47	8.46	12.10	3.6	34.60	0.0
12 m	California	64.52	0.0	19.52	3.6	8.84	12.65	3.6	33.61	3.6	16.01	6.56	10.08	15.40	3.6	37.90	0.0
15 m	STAA	67.85	0.0	22.83	3.6	9.47	14.91	3.6	38.39	3.6	22.69	9.09	11.70	20.14	3.6	42.64	0.0

Figura 5-47. Diseño de una intersección no canalizada según "California DOT Design Manual"

Necesidad

La Instrucción de Trazado 3.1 I.C. (Ministerio de Fomento, 1999) indica los requisitos para instalar cuñas y canalizaciones en una intersección.

Se dispondrán cuñas de salida de la carretera, independientemente de la existencia o no de carriles adicionales, en los siguientes casos:

- Entradas y salidas de carreteras convencionales de clase C60 que no dispongan de carriles de cambio de velocidad.
- En cualquier otro caso previa justificación.
- Se dispondrá canalización en una intersección siempre que la IMD de la vía secundaria supere el valor de 300.

5.9.4 Cambio de carril

Según la National Highway Traffic Safety Administration (1996), muchos accidentes de los que se producen en las autopistas son debidos a cambios de carril e incorporaciones, durante los cuales no se percibe la presencia de un vehículo que se aproxima desde el **ángulo muerto.** Debido a esto, se trata de que los conductores que vayan a realizar un cambio de carril sean capaces de percibir los vehículos que tengan cercanos, para no originar colisiones laterales, e incluso se debe avisar en cuanto aparezca un vehículo en la zona conflictiva, aunque en ese momento el conductor no exprese sus intenciones de realizar la maniobra, ya que, en ocasiones, las acciones pueden resultar imprevistas debido al nerviosismo o ansiedad del conductor que intenta realizar un adelantamiento.

En este sentido se han desarrollado múltiples estudios acerca de **dispositivos electrónicos de detección de obstáculos laterales** que facilitan estas tareas. En otro capítulo posterior de este documento se resumen algunas ideas sobre los diferentes tipos de dispositivos que existen y sus capacidades, así como sus limitaciones.

5.9.5 Confluencias

Según la Instrucción 3.1-IC española, editada por la Dirección General de Carreteras (1999), "las confluencias y bifurcaciones se establecerán por la coincidencia de flujos de tráfico similares" y "la cotangente del ángulo entre bordes de calzada deberá ser como máximo de 65 para confluencias, y de 50 para bifurcaciones", lo cual no deja de resultar llamativo, ya que limita el grado de paralelismo de estas vías, si es que se puede definir éste, y puesto que las vías no suelen formar un ángulo en la punta, y a lo mucho se podría definir este ángulo en la sección característica (calzadas separadas 1 metro como se puede ver en la Figura 5-48).

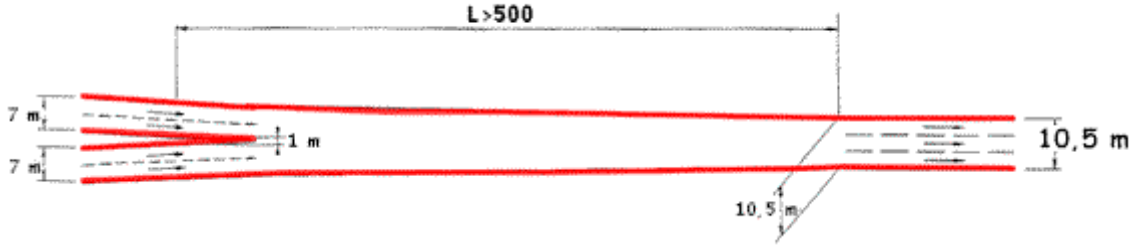


Figura 5-48. Esquema de una confluencia mostrando la sección de referencia.

En resumidas cuentas, los vehículos que se acercan a la confluencia deben vigilar el tráfico en la otra calzada, ya que el número de carriles puede reducirse al llegar a ésta. La diferencia entre este caso y el resto reside en que en esta situación ningún vehículo posee preferencia respecto al otro, de modo que las confusiones pueden ser mayores aún en cuanto a quién cede el paso. Si el ángulo con el que se acercan las calzadas es pequeño y la transición de acercamiento suave, los conductores podrán fiarse de los retrovisores para realizar las maniobras necesarias; pero, si la transición es brusca y el ángulo en la sección de referencia grande, los conductores pueden tener problemas para maniobrar en la confluencia.

5.10 Conclusión

En este apartado se ha realizado un desarrollo teórico sobre los nudos en carreteras: sus elementos, sus tipologías, y los criterios actuales de diseño. Con ello se ha pretendido establecer las definiciones de los conceptos que a lo largo del resto del texto se utilizarán.

De esta manera se ha profundizado sobre las maniobras de cruce e incorporación, identificando las diferentes situaciones en las que se dan, y cómo afecta la oblicuidad a todas ellas.

6 Oblicuidad

6.1 Concepto

Durante este apartado se han ido comentando aspectos de la geometría de nudos, haciendo hincapié en la oblicuidad.

La oblicuidad, como concepto global en el diseño de nudos de carretera, se refiere a ciertos valores del ángulo entre las trayectorias. Ángulos bajos, cercanos a 0º, son adecuados para realizar maniobras de incorporación; mientras que ángulos cercanos a 90º lo son para realizar maniobras de cruce. Los ángulos intermedios dan problemas para ambos tipos de maniobras.

6.2 Posibles interpretaciones

Hay una cierta confusión con el concepto, pues se puede aplicar a diversas características del nudo.

- Por un lado, la oblicuidad puede referirse al **ángulo que forman entre sí los ejes** centrales de dos vías que llegan a un nudo. Este ángulo es el que nos diferencia una intersección en "X" de una "+".
- Por otro lado, la oblicuidad puede referirse al **ángulo que forman entre sí dos ramales que se cruzan**. Según el diseño de la canalización en un nudo, es posible que esta oblicuidad no tenga nada que ver con la anterior. Una intersección en cruz puede tener un ramal de incorporación muy oblicuo; y una intersección en aspa puede tener un ramal de incorporación casi paralelo.
- Por último, hemos de considerar que la trayectoria real seguida por un conductor no tiene por qué coincidir con el eje del ramal por el que circula. Puede que en una incorporación oblicua el conductor reoriente su trayectoria para que se parezca más a una incorporación mediante carril de aceleración. Por tanto, puede definirse un tercer tipo de oblicuidad según el **ángulo real adoptado por los conductores respecto al eje de la vía** que pretenden cruzar o de la vía a la que intentan incorporarse.

6.2.1 Ejemplos

Estas reflexiones se ilustran ahora mediante algunos esquemas.

En la Figura 6-1 vemos una intersección en "T", a 90º, como dictan todas las recomendaciones. Sin embargo, debido a una deficiente canalización, encontramos un ramal de incorporación oblicuo. En el lado opuesto de la vía, tenemos un ramal de giro a izquierdas en "raqueta". Aunque el tramo final de la raqueta tiene un ángulo cercano a 90º respecto a las vías a cruzar, el vehículo que circula por él no se ha situado perpendicularmente a estas vías, sino con un ángulo oblicuo.

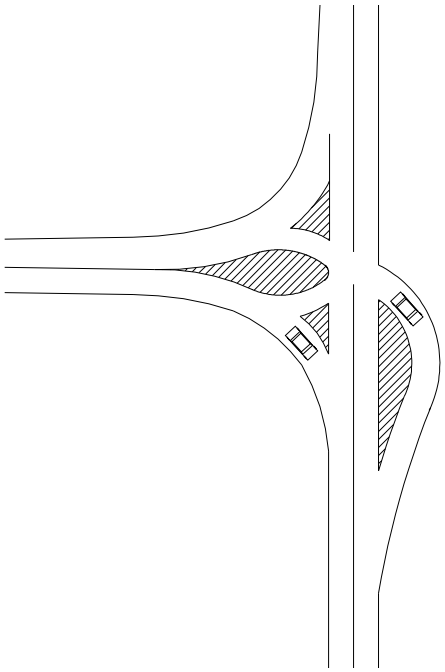


Figura 6-1. Intersección en T con canalización deficiente

En la Figura 6-2 se muestra cómo una intersección en Y, a 135º, tiene un ramal de incorporación adecuado para conseguir una fácil maniobra al conductor. En realidad, el ramal de incorporación tiene un tramo final similar a un carril de aceleración (o carril de cambio de velocidad). Al conseguir un tramo final paralelo al eje de la vía a la que se incorpora, durante una cierta distancia, el vehículo puede orientarse adecuadamente. No es un carril de aceleración puesto que no tiene la suficiente longitud.

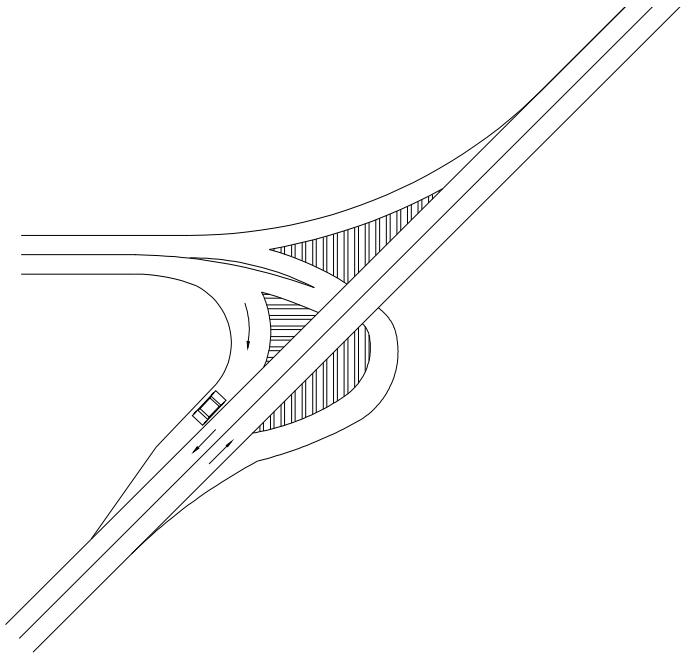
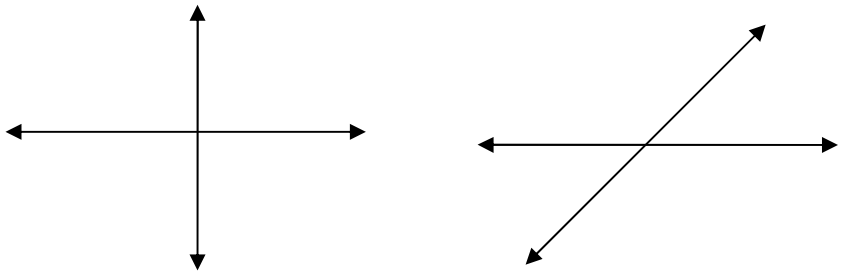


Figura 6-2. Intersección en Y con ramales de incorporación y cruce sin oblicuidad

6.3 Ángulos

6.3.1 Ángulo de nudo

El ángulo de un nudo es el ángulo que forman los ejes centrales de ambas vías. Este concepto se ha descrito con anterioridad.



Intersecciones en "+" y en "X"

6.3.2 Ángulo de un ramal

El ángulo que forma un ramal de incorporación o cruce respecto de la vía principal define la oblicuidad de dicho ramal. Pero este ángulo puede medirse de diversas maneras.

Según las especificaciones de la "Instrucción de trazado 3.1-IC" (Ministerio de Fomento, 1999), este ángulo es el que forman la línea exterior de pavimento en el ramal con la línea exterior de pavimento de la vía principal. A este ángulo se le impone que tenga cotangente superior a 45, es decir, menor que 2,86º. Pero hay otros.

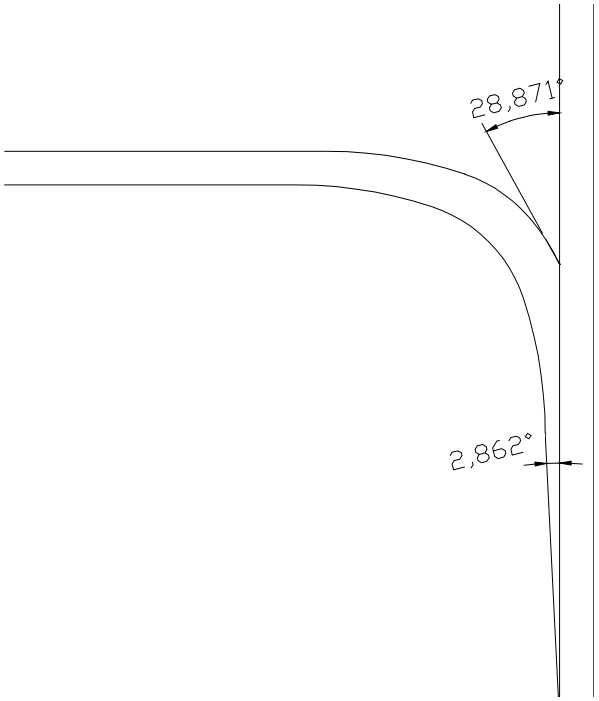


Figura 6-3. Posibles ángulos entre el ramal y la vía principal

Hay otros ángulos que podemos medir para caracterizar un ramal de incorporación. **Hay 4 posibles ángulos de interés** (Figura 6-4). Por un lado tenemos el ángulo que forman los ejes (punto medio) de los carriles entre sí, en el punto de incorporación. Este ángulo es algo complicado de determinar. También podemos tratar de determinarlo en el punto en que el eje del ramal de incorporación llega a su fin.

Otros ángulos de más fácil determinación son los que forman las líneas de límite de pavimento, las líneas que delimitan el arcén, entre sí. Si, como es habitual, el carril de incorporación presenta un acuerdo en trazado en planta, estos ángulos serán distintos entre sí. Por el lado interno, el ángulo será reducido, tendiendo a cero pues las líneas suelen ser tangentes entre sí. Por tanto no es un dato representativo que diferencie unas intersecciones de otras. Por el lado exterior, el ángulo es más acusado.

De los tres ángulos, **el más importante es el intermedio**, formado por los ejes centrales de carril. Tendrá un valor aproximadamente igual al promedio de los otros dos ángulos extremos (formados por las líneas de arcén o borde de pavimento).

Para el conductor, tiene más importancia la línea exterior de la curva que la interior. La gran mayoría de los conductores fijarán su trayectoria tomando como referencia la línea de la izquierda del carril de incorporación, pues es el límite que les indica si están perdiendo el control y se están saliendo de la trayectoria, con lo que tienen que girar aún más el volante. Por otro lado, esta línea está en la dirección en la que están mirando los conductores, esto es, de donde procede el tráfico principal.

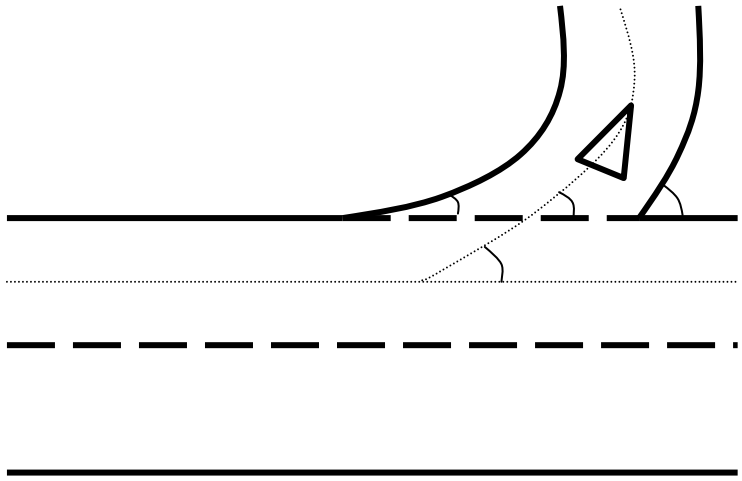


Figura 6-4. Posibles ángulos entre el ramal y la vía principal (bis)

6.4 Ángulo del vehículo

Este ángulo es el que forma **el eje del vehículo con el eje del carril** con preferencia o principal.

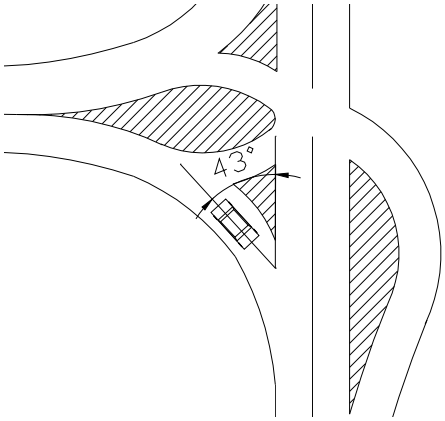


Figura 6-5. Ángulo entre el vehículo y la vía principal

6.5 Relaciones

Como podemos observar, la oblicuidad de la intersección no tiene ningún interés cuando ésta tiene canalizaciones. Es más importante la oblicuidad de cada uno de los ramales de cruce o incorporación, es decir, el ángulo entre éstos y el eje de la vía principal.

La trayectoria seguida por el conductor y el trazado del ramal en el que circula están íntimamente relacionados. Si el ramal es estrecho, el conductor tiene poca holgura para hacer una trayectoria diferente. En caso contrario, el conductor puede reorientar su vehículo y desplazarse lateralmente respecto del eje. Esto nos conduce a determinar que hay una **fuerte relación entre el ángulo del eje del ramal y el ángulo de la trayectoria del vehículo**. En consecuencia, la oblicuidad del ramal y la oblicuidad adoptada por el vehículo están relacionadas fuertemente, pero no son iguales.

En conclusión, la oblicuidad realmente importante es la que se refiere al ángulo del vehículo, esto es, ángulo entre el vehículo sin preferencia que pretende hacer la maniobra y el tráfico principal. Este ángulo va variando a lo largo de la trayectoria. Pero el instante en que es más importante es el momento de la decisión, esto es, el punto en el cual el conductor se decide a iniciar la maniobra.

6.6 Problemas relacionados con la oblicuidad

Las intersecciones oblicuas originan una serie de problemas que se comentan a continuación, como indican varios autores, como la AASHTO (2001), Ortega y García (1999), Gattis y Low (1997), Walker (1993), Neuman y otros (1985), o Staplin y otros (2001):

- Comodidad.
- Funcionalidad.
- Economía.
- Seguridad.

6.6.1 Comodidad

Las intersecciones oblicuas son menos cómodas. Al acercarse un conductor a una intersección oblicua, con un movimiento ligero de cabeza puede ver los vehículos que se aproximan en una dirección como se ve en la figura, pero para ver los que se aproximan en el sentido opuesto **se verá obligado a girar la cabeza considerablemente**. Esto es incómodo para la mayoría, y puede ser ciertamente impracticable para algunos conductores con limitaciones físicas.

Figura 6-6. Fotos de conductores girando su tronco y cuello para ganar visibilidad

6.6.2 Funcionalidad

Las intersecciones oblicuas **tienen menos capacidad**. El ángulo de visión del conductor en una de las direcciones es muy pequeño, de modo que resulta más complicado encontrar un hueco en el tráfico que se acerca al vehículo. Esto disminuye la capacidad de la intersección, **se originan demoras**.

Acerca de la influencia de estas intersecciones en el comportamiento de los conductores, Tarawneh y McCoy (1996) realizan una investigación en la que someten a varios conductores a vigilancia mientras realizan varios giros a la derecha por calles de una ciudad norteamericana. Los parámetros que se tienen en cuenta para el estudio son la edad, el sexo del conductor y la geometría de la intersección. Una de las 4 intersecciones (intersección C) es una intersección canalizada oblicua a derechas, con un ángulo de 65 grados y sin carriles de aceleración y se realizan estadísticas acerca de varios comportamientos durante los giros: conductores que intentan hacer un giro a derechas con

el semáforo en rojo, conductores que no miran los retrovisores al intentar hacer un giro a derechas con el semáforo en rojo, conductores que hacen el giro a derechas con el semáforo en rojo sin antes detenerse, perfil de aceleraciones tras girar a la derecha y velocidad media durante el giro a derechas. Las otras intersecciones donde se llevó a cabo el estudio son: una intersección en 90 grados no canalizada (intersección A), una intersección en 90 grados canalizada con carril de aceleración (intersección B) y una intersección en 90 grados canalizada sin carril de aceleración (intersección D).

Cabe citar que en EEUU los giros a derecha están permitidos aunque el semáforo esté en rojo, realizando una especie de "ceda el paso", y de ahí que se analice las veces que un conductor realiza un giro a derechas con el semáforo en rojo.

Age	Gender	Percentages of Drivers Who Made an Attempt to *Make RTOR at Intersection (See Legend Below)*				Means & *Standard* Deviations
		A	B	C	D	
Middle (25-45)	Female	19 15 78.9%	20 15 75.0%	20 14 70.0%	17 13 76.5%	75.1% 3.8%
	Male	22 20 90.9%	24 21 87.5%	23 21 91.3%	20 18 90.0%	89.9% 1.7%
Old (65-74)	Female	25 9 36.0%	24 10 41.7%	27 9 33.3%	28 12 42.9%	38.5% 4.6%
	Male	22 13 59.1%	27 15 55.6%	26 10 38.5%	26 13 50.0%	50.8% 9.0%
Older (75+)	Female	21 2 9.5%	23 5 21.7%	20 2 10.0%	22 3 13.6%	13.7% 5.6%
	Male	23 5 21.7%	25 5 20.0%	22 3 13.6%	24 6 25.0%	20.1% 4.8%
Means & Standard Deviations		49.4% 32.3%	50.2% 27.7%	42.8% 32.0%	49.7% 29.3%	48.0% 28.5%

A: Unchannelized RT Lane at 90-Degree Intersection
B: Channelized RT Lane With Acceleration Lane at 90-Degree Intersection
C: Channelized RT Lane Without Acceleration Lane at Skewed Intersection
D: Channelized RT Lane Without Acceleration Lane at 90-Degree Intersection

Tabla 6-1. Conductores que intentaron realizar un giro a derechas con el semáforo en rojo.

Como se puede observar en la Tabla 6-1, existe una diferencia entre la intersección oblicua y el resto en cuanto a conductores que intentaron realizar un giro a derechas con el semáforo en rojo (se refiere solo a los intentos, no quiere decir que lo lleve a cabo finalmente). Sin embargo, un análisis ANOVA realizado con estos datos, estableció que la geometría de la intersección no afectaba a la probabilidad de intentar ejecutar ese giro a derechas con el semáforo en rojo.

Age	Gender	Percentages of Drivers Who Depended on Head/Neck Only in Their Attempt to Make RTOR at Intersection (See Legend Below)				Means & Standard Deviations
		A	B	C	D	
Middle (25-45)	Female	15 15 100.0%	15 14 93.3%	14 10 71.4%	13 12 92.3%	89.2% 12.4%
	Male	20 20 100.0%	21 19 90.5%	21 16 76.2%	18 16 88.9%	88.9% 9.8%
Old (65-74)	Female	9 9 100.0%	10 9 90.0%	9 7 77.8%	12 12 100.0%	92.0% 10.5%
	Male	13 13 100.0%	15 14 93.3%	10 7 70.0%	13 12 92.3%	88.9% 13.1%
Older (75+)	Female	2 2 100.0%	5 5 100.0%	2 2 100.0%	3 3 100.0%	100.0% 0.0%
	Male	5 5 100.0%	5 5 100.0%	3 3 100.0%	6 6 100.0%	100.0% 0.0%
Means & Standard Deviations		100.0% 0.0%	94.5% 4.5%	82.6% 13.8%	95.6% 5.0%	93.2% 9.7%

A: Unchannelized RT Lane at 90-Degree Intersection
B: Channelized RT Lane With Acceleration Lane at 90-Degree Intersection
C: Channelized RT Lane Without Acceleration Lane at Skewed Intersection
D: Channelized RT Lane Without Acceleration Lane at 90-Degree Intersection

Tabla 6-2. Conductores que no necesitaron mirar sus retrovisores al realizar un giro a derechas con el semáforo en rojo.

Al analizar a los conductores que no necesitaron mirar sus retrovisores laterales para realizar el giro a derechas con el semáforo en rojo, también se observa que la intersección oblicua fue aquella en la que los conductores necesitaron más los retrovisores laterales al efectuar el giro, o al menos eso creyeron los sujetos del experimento. Se pueden observar estos datos en la Tabla 6-2. Esta vez, el test ANOVA corroboró aquello que parece evidente, resultando significantes los parámetros edad, geometría y su interacción. Al realizar otro test estadístico, el test Tukey, éste indicó que "el porcentaje de sujetos que no usaron sus espejos laterales fue significantemente más bajo en la intersección oblicua que en el resto". De otra manera, **la oblicuidad obliga a utilizar el retrovisor**.

Age	Gender	Percentages of Drivers who Made RTOR Out of the Total Who Had the Opportunity to Make RTOR at Intersection (See Legend Below)				Means & Standard Deviations
		A	B	C	D	
Middle (25-45)	Female	18 14 77.8%	18 13 72.2%	19 13 68.4%	17 12 70.6%	72.2% 4.0%
	Male	20 18 90.0%	21 19 90.5%	21 18 85.7%	17 15 88.2%	88.6% 2.2%
Old (65-74)	Female	21 8 38.1%	22 8 36.4%	24 6 25.0%	25 8 32.0%	32.9% 5.8%
	Male	21 10 47.6%	25 12 48.0%	23 7 30.4%	22 10 45.5%	42.9% 8.4%
Older (75+)	Female	20 2 10.0%	20 4 20.0%	18 2 11.1%	17 2 11.8%	13.2% 4.6%
	Male	19 4 21.1%	22 4 18.2%	20 3 15.0%	21 4 19.0%	18.3% 2.5%
Means & Standard Deviations		47.4% 31.4%	47.6% 29.0%	39.3% 30.6%	44.5% 29.9%	44.7% 28.4%

A: Unchannelized RT Lane at 90-Degree Intersection
B: Channelized RT Lane With Acceleration Lane at 90-Degree Intersection
C: Channelized RT Lane Without Acceleration Lane at Skewed Intersection
D: Channelized RT Lane Without Acceleration Lane at 90-Degree Intersection

Tabla 6-3. Conductores que realizaron el giro a derechas con el semáforo en rojo del total que tuvieron la oportunidad.

De modo análogo al usado en los análisis anteriores, se estudiaron los conductores que realizaron el giro a derechas con el semáforo en rojo, y los datos parecen mostrar que en la intersección oblicua un menor número de sujetos llevaron a cabo esta maniobra, como se puede ver en la Tabla 6-3. De nuevo el test ANOVA reflejó la veracidad de estas hipótesis, resultando significantes los parámetros edad, sexo, geometría y la interacción entre la edad y el sexo. Mientras, el test Tukey indicó otra vez la influencia de la geometría de la intersección en los resultados obtenidos.

Age	Gender	Percentages of Drivers Made RTOR Without Complete Stop Out of the Total Number Who Made RTOR at Intersection (See Legend Below)				Means & Standard Deviations
		A	B	C	D	
Middle (25-45)	Female	14 3 21.4%	13 8 61.5%	13 1 7.7%	12 5 41.7%	33.1% 23.5%
	Male	18 4 22.2%	19 13 68.4%	18 2 11.1%	15 7 46.7%	37.1% 25.6%
Old (65-74)	Female	8 0 0.0%	8 4 50.0%	6 0 0.0%	8 3 37.5%	21.9% 25.8%
	Male	10 1 10.0%	12 7 58.3%	7 0 0.0%	10 4 40.0%	27.1% 26.9%
Older (75+)	Female	2 0 0.0%	4 0 0.0%	2 0 0.0%	2 0 0.0%	0.0% 0.0%
	Male	4 0 0.0%	5 1 20.0%	3 0 0.0%	4 0 0.0%	5.0% 10.0%
Means & Standard Deviations		8.9% 10.7%	43.0% 27.0%	3.1% 5.0%	27.7% 21.6%	20.7% 23.4%

A: Unchannelized RT Lane at 90-Degree Intersection
B: Channelized RT Lane With Acceleration Lane at 90-Degree Intersection
C: Channelized RT Lane Without Acceleration Lane at Skewed Intersection
D: Channelized RT Lane Without Acceleration Lane at 90-Degree Intersection

Tabla 6-4. Porcentaje de conductores que realizaron el giro a derechas con el semáforo en rojo sin detenerse completamente.

En la Tabla 6-4 pueden observarse los datos que muestran a los conductores que realizaron el giro a derechas con el semáforo en rojo sin detenerse. La intersección oblicua muestra el menor porcentaje de sujetos que cumplieron esa condición, lo cual indica el cambio de comportamiento en los conductores ante estas intersecciones. El test ANOVA consideró significantes los parámetros edad, geometría, sexo y la interacción entre la edad y la geometría. El test Tukey apuntó esta vez que no existía diferencia significativa entre los resultados en la intersección no canalizada y la oblicua.

Como conclusión de este estudio, se puede afirmar que el hecho de afrontar una intersección oblicua origina que **los conductores varíen su actitud**, lo cual no tiene por qué ser dañino, ya que puede ser causa de una mayor atención y precaución. De todos modos, por esa razón estas situaciones merecen ser estudiadas para mejorar los problemas que pueden surgir. Además, según los datos y estadísticas, es menos probable que los conductores intenten o realicen giros a derecha con el semáforo en rojo, y si lo efectúan, el tipo de intersección hace que los sujetos utilicen con mayor frecuencia los retrovisores laterales. Por tanto, **en las intersecciones oblicuas los conductores requieren de mayores huecos** en el tráfico para realizar la maniobra, **y usan más el retrovisor**.

Otro estudio de Saka (1998) indica que los problemas de visibilidad influyen negativamente en la capacidad de las intersecciones.

6.6.3 Economía

Las intersecciones oblicuas **son más caras**. Al aumentar el área de la intersección, aumenta el área pavimentada, y el área de suelo ocupado (expropiaciones).

6.6.4 Seguridad

Este aspecto es el más importante de todos. A continuación se detallan las principales causas de que este tipo de enlaces sean **más inseguros**.

En la siguiente figura se muestra cómo el **área cubierta por la visión** en un sentido de circulación es mucho mayor que en el otro, debido a la oblicuidad.

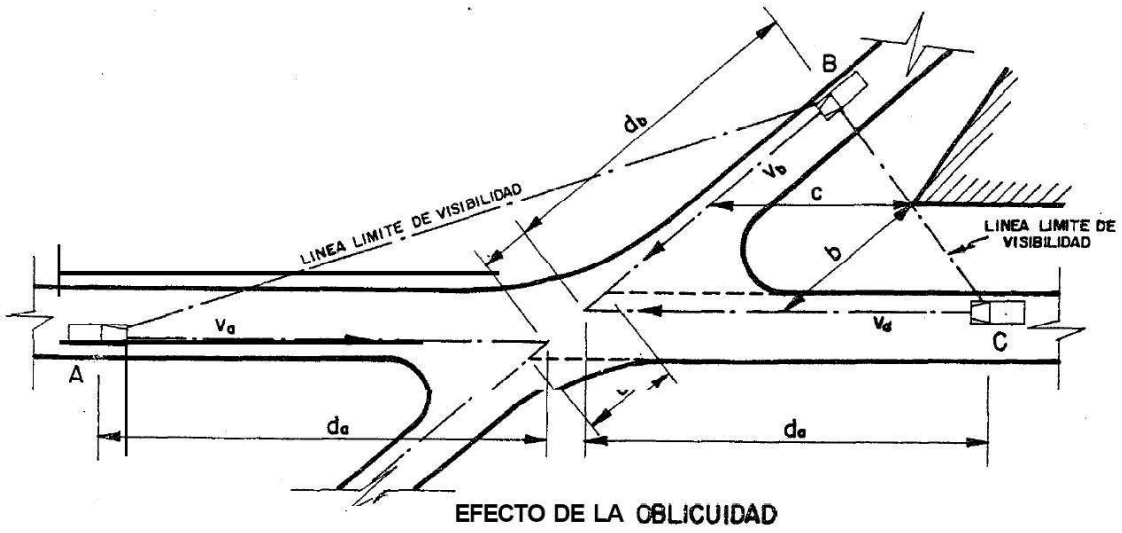


Figura 6-7. Esquema donde se muestra que en intersecciones oblicuas el conductor debe girar mucho la cabeza

En una intersección oblicua, puede que una parte de la vía principal quede fuera del campo de visión del conductor sin preferencia. **La vía puede estar en el ángulo muerto**. Esto se debe a los elementos del propio automóvil, como ventanillas opacas, montantes de la carrocería, paneles opacos en vehículos comerciales, y problemas similares.

En el esquema de la Figura 6-8 se muestra en gris el campo de visión cubierto por el conductor. Puede observarse cómo, debido a la oblicuidad de la intersección, ambos camiones no poseen una buena visión de la vía principal a la que tratan de incorporarse.

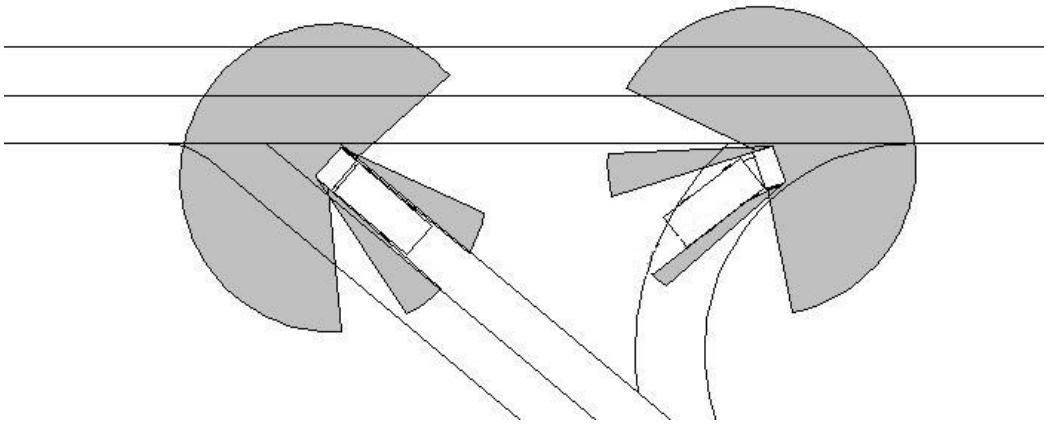


Figura 6-8. Camión frente a una intersección oblicua en la que no tiene visibilidad

Existen poblaciones de **sujetos con limitaciones**, por cuestiones de edad, enfermedad o accidentes sufridos. Éstos ven limitadas sus posibilidades de girar la cabeza o de visión periférica, lo cual afectará notablemente a su comportamiento en estas situaciones.

Figura 6-9. Persona mayor al volante

Los conductores suelen encontrar **mayores problemas para encauzar su trayectoria** sin salirse de sus zonas correspondientes, dada la pérdida de perpendicularidad que puede originar confusión. Además, el hecho de girar la cabeza en una y otra dirección rápidamente, puede afectar a la correcta alineación del vehículo.

La zona de conflicto aumenta al disminuir el ángulo de la intersección desde 90 grados. Los vehículos (así como los peatones) que atraviesan una intersección oblicua recorren una mayor distancia hasta cruzar totalmente la otra carretera, de modo que aumenta el peligro de colisión.

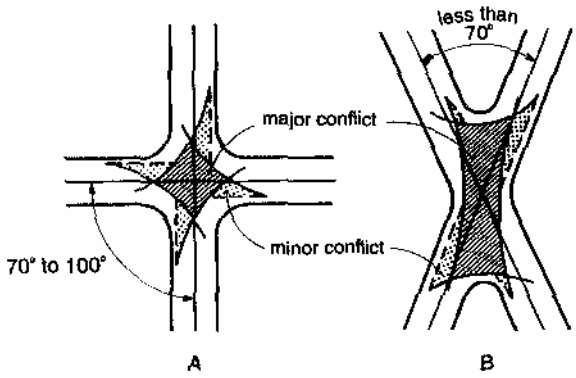


Figura 6-10. Imagen de la zona conflictiva en una intersección perpendicular y otra oblicua

Este problema puede verse agravado si el vehículo en cuestión es un camión u otro vehículo pesado, dada su mayor longitud y menor aceleración. **Los vehículos con menos maniobrabilidad tardan más en realizar la maniobra**.

En intersecciones oblicuas, los vehículos largos que giren a la derecha en una intersección oblicua a izquierdas o a la izquierda en una intersección oblicua a derechas, pueden verse en la obligación de **invadir el sentido contrario** para completar la maniobra, lo cual puede originar una situación peligrosa, como la que se observa en la Figura 6-11. También puede darse el caso de invadir varios carriles del mismo sentido, situación que también es peligrosa.

Figura 6-11. Invasión del carril contrario de un vehículo largo al realizar un giro en una intersección oblicua

Dado el problema anterior, la solución evidente es crear grandes superficies que permitan a estos conductores realizar esas maniobras sin peligro, pero eso puede originar, si no están delimitadas e indicadas las zonas reservadas para cada operación, que los conductores de turismos se confundan y se desvíen de las trayectorias adecuadas. El aumento de la zona de conflicto supone una disminución en la seguridad.

En estas intersecciones, si una de las carreteras es de escasa entidad como vías pecuarias o similares, al realizar la intersección o incorporación a la carretera principal, tendrá que atravesar la **cuneta** de ésta. Al ser oblicua, lo realizará primero con una rueda y luego con la otra, lo cual puede ser molesto y ser origen de distracciones en el conductor.

Según la dirección de oblicuidad, algunas maniobras tendrán **radios de giro muy grandes**. Esto se da, por ejemplo, en una oblicuidad a derechas, para el giro a derechas. El conductor puede pensar en realizar esa maniobra a una velocidad mayor de lo habitual, ya que el ángulo de giro necesario del volante es menos pronunciado. Esto puede originar accidentes con otros automóviles que se aproximen a ese nudo.

6.7 Conclusión

La oblicuidad es un concepto que puede adoptar diferentes interpretaciones, en función del contexto, lo que ha dado lugar a confusiones en el pasado.

Lo que queda claro es que la oblicuidad en intersecciones de carretera debe ser evitada, puesto que genera problemas de comodidad, funcionalidad, economía, y, sobre todo, de seguridad.

Con respecto a este último problema, en un capítulo posterior se analizan estadísticas de accidentalidad en carreteras, identificando cómo la oblicuidad es un factor que aumenta la peligrosidad de las intersecciones.

7 Visibilidad en intersecciones

7.1 Introducción

En este apartado se recogen algunas prescripciones que aparecen en la normativa, relativas a garantizar una adecuada visibilidad en intersecciones de carretera.

7.2 Normativa española

7.2.1 Conceptos básicos

En el presente apartado se dan algunas definiciones según la Instrucción de Carreteras Norma 3.1-IC 1999 de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento (1999), para dejar claros algunos conceptos.

Distancia de parada: "Se define como distancia de parada (D_p) la distancia total recorrida por un vehículo obligado a detenerse tan rápidamente como le sea posible, medida desde su situación en el momento de aparecer el objeto que motiva la detención. Comprende la distancia recorrida durante los tiempos de percepción, reacción y frenado. Se calculará mediante la expresión (1):

$$D_p = \frac{V \cdot t_p}{3{,}6} + \frac{V^2}{254 \cdot (f_l + i)} \qquad (1)$$

Siendo: D_p= distancia de parada (m).

V = velocidad (km/h).

f_l = coeficiente de rozamiento longitudinal rueda-pavimento.

i = inclinación de la rasante (en tanto por uno).

t_p = tiempo de percepción y reacción (s).

Se considera que el tiempo de percepción-reacción es constante e igual a 2 segundos.

Visibilidad de parada: "Se considerará como visibilidad de parada la distancia a lo largo de un carril que existe entre un obstáculo situado sobre la calzada y la posición de un vehículo que circula hacia dicho obstáculo, en ausencia de vehículos intermedios, en el momento en que puede divisarlo sin que luego desaparezca de su vista hasta llegar al mismo".

Distancia de cruce: "Se define como distancia de cruce (D_c), la longitud recorrida por un vehículo sobre una vía preferente, durante el tiempo que otro emplea en atravesar dicha vía. Se calculará mediante la fórmula (2):

$$D_c = \frac{V \cdot t_c}{3{,}6} \qquad (2)$$

Siendo:

D_c = distancia de cruce (m).

V = velocidad (km/h) de la vía preferente. Asume que el vehículo de la vía preferente no varía su velocidad al acercarse a la intersección.

t_c = tiempo en segundos que se tarda en realizar la maniobra completa de cruce, desde la vía sin preferencia.

El valor de t_c se obtiene de la fórmula (3):

$$t_c = t_p + \sqrt{\frac{2 \cdot (3 + l + w)}{9{,}8 \cdot j}} \qquad (3)$$

Siendo:

t_p = tiempo de reacción y percepción del conductor, en segundos. Se adoptará siempre un valor constante igual a dos segundos (t_p = 2 s).

l = longitud en metros del vehículo que atraviesa la vía principal. Se considerarán los siguientes valores, en función del estudio del tipo de tráfico en el cruce:

- l = 18 m para vehículos articulados.
- l = 10 m para vehículos pesados rígidos.
- l = 5 m para vehículos ligeros.

w = anchura del total de carriles, (m), de la vía principal.

j = aceleración del vehículo que realiza la maniobra de cruce, en fracciones de la aceleración de la gravedad (9,81 m/s^2). Se tomará un valor de:

- j = 0,15 para vehículos ligeros,
- j = 0,075 para vehículos pesados rígidos, y
- j = 0,055 para vehículos articulados.

Visibilidad de cruce: "Se considerará como visibilidad de cruce, la distancia que precisa ver el conductor de un vehículo para poder cruzar otra vía que interseca su trayectoria, medida a lo largo del eje de su carril. Está determinada por la condición de que el conductor del vehículo de la vía preferente pueda ver si un vehículo se dispone a cruzar sobre dicha vía". Se puede ver un esquema de este concepto en la Figura 7-1.

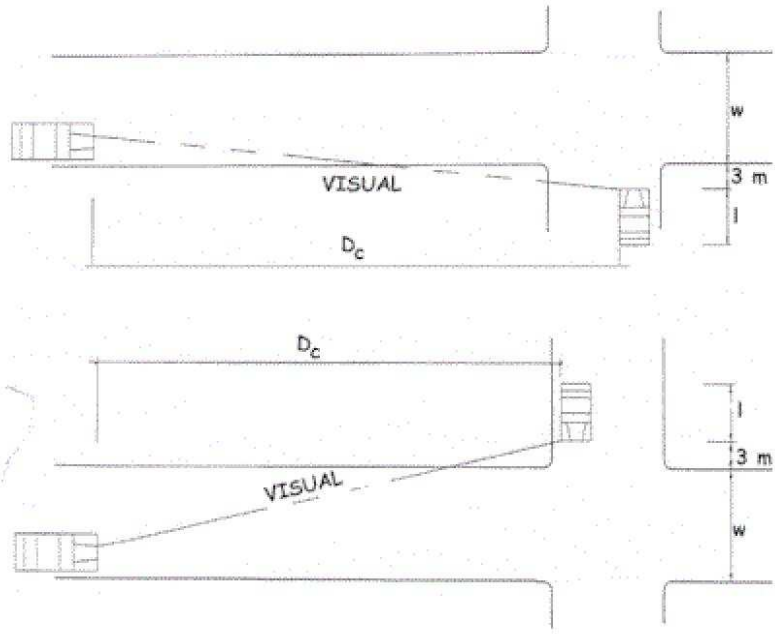


Figura 7-1. Triángulos de visibilidad para la instrucción 3.1-IC española

7.2.2 Visibilidad en función de la señalización

Se plantea la visibilidad de los vehículos antes de realizar alguna maniobra dependiendo del tipo de regulación que exista en el cruce. La instrucción actual (Ministerio de Fomento, 1999) no incluye este apartado. Hay que remontarse a las "Recomendaciones para el Proyecto de Intersecciones" de la Dirección General de Carreteras (1968). Según este texto, "debe disponerse en toda la intersección una zona o triángulo de visibilidad de suficientes dimensiones para que permita a los conductores de los vehículos que acceden simultáneamente al cruce, verse unos a otros con el tiempo debido, al objeto de prevenir posibles colisiones".

Estas recomendaciones españolas, que están obsoletas, sólo consideran tres casos generales para obtener el triángulo mínimo requerido libre de obstáculos, y si estas condiciones no se cumplen por geometría, el diseñador se verá obligado a situar limitaciones de velocidad para cumplir los objetivos. Estos tres casos son: posibilidad de ajustar la velocidad de los vehículos ante el cruce en intersecciones no reguladas por señales de "stop", posibilidad de parada ante el cruce en intersecciones no reguladas por señales de "stop" y obligatoriedad de parada de los vehículos ante el cruce con una carretera principal en intersecciones reguladas por señales de "stop".

En el **caso I** (posibilidad de ajustar la velocidad de los vehículos ante el cruce), los vehículos necesitan un tiempo de percepción, reacción y modificación de la velocidad para evitar una colisión. La norma española estima este tiempo en 3 segundos, y el espacio recorrido por el automóvil durante este tiempo es la distancia de visibilidad necesaria en este caso. Está entre 0,5 y 1 vez la distancia de visibilidad de parada, así que solo debe usarse en intersecciones con poco tráfico. La norma muestra una tabla donde para cada velocidad se informa de la distancia mínima. Si ésta no se cumple, habría que situar una señal de "stop" o limitar las velocidades en los ramales de aproximación. Se puede ver un esquema de la intersección en la Figura 7-2.

En el **caso II** (posibilidad de parada ante el cruce) el conductor debe ser capaz de detener su vehículo antes de llegar a la intersección para evitar la colisión con otro automóvil. Es una opción más segura, ya que el conductor puede elegir entre modificar la velocidad para no coincidir o detenerse antes de introducirse en la intersección. En este caso, cada ramal debe tener la longitud exigida por la distancia de parada, que se definió en el primer apartado de este capítulo; y si no se cumple, se vuelven a aplicar las posibilidades comentadas anteriormente (señales de "stop" o limitación de velocidad). El esquema es el mismo que el caso anterior, que se puede consultar en la Figura 7-2.

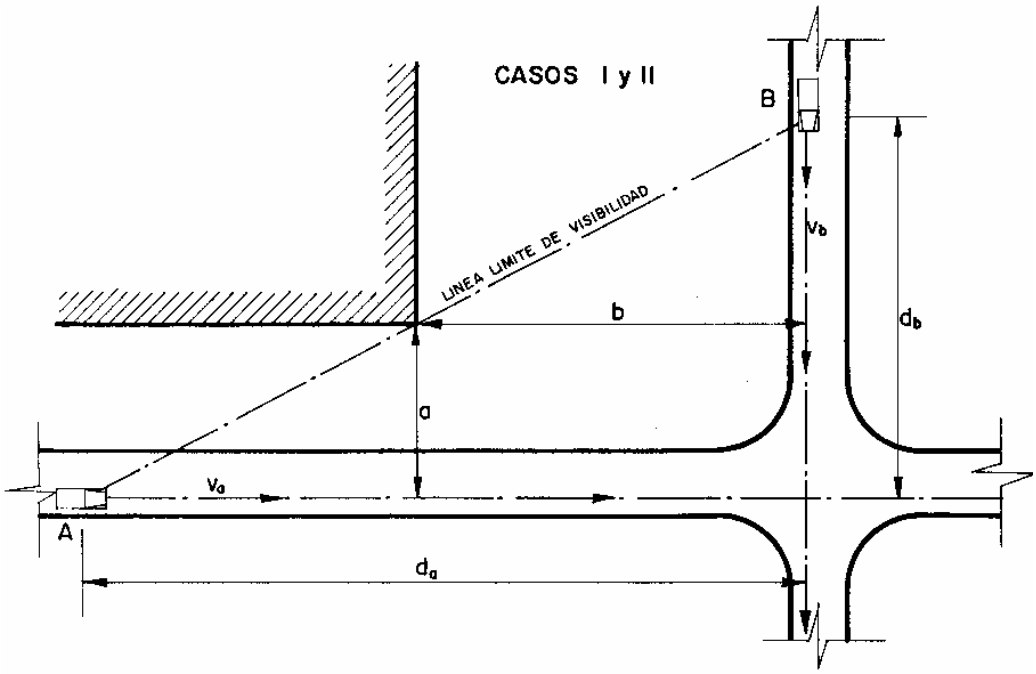


Figura 7-2. Triángulos de visibilidad según las "Recomendaciones para el Proyecto de Intersecciones" de la Dirección General de Carreteras

En el caso de que aparezca un obstáculo visual que no puede ser eliminado, como un edificio, se aplica una relación de triángulos, Se mantiene la velocidad de la vía principal y se limita la otra velocidad, siendo ésta la adecuada para la distancia de visibilidad, y ésta la proporciona la fórmula (4) que se extrae de la semejanza de triángulos:

$$d_b = \frac{a \cdot d_a}{d_a - b} \qquad (3)$$

En el **caso III** (obligatoriedad de parada de los vehículos ante el cruce con una carretera principal), el conductor que se encuentra parado en un ramal (intersección regulada por señales de "stop") debe tener el tiempo suficiente como para cruzar la carretera sin verse implicado en un accidente con el automóvil que circula en la otra dirección. La distancia que se requiere en la vía principal es *d*, que se obtiene de la fórmula (5):

$$d = 0{,}275 \cdot V \cdot (t + t_a) \qquad (4)$$

Siendo:

d = distancia mínima de visibilidad en la carretera principal, en m.

V = velocidad específica de la vía principal, en km/h.

t = tiempo de percepción y reacción para arrancar el vehículo parado, que puede tomarse como 1 segundo en zonas urbanas y 2 segundos en zonas rurales.

t_a = tiempo requerido para acelerar y atravesar la distancia D necesaria para despejar la carretera principal, en segundos. Se tomará de una tabla que proporciona la misma norma en función del tipo de vehículo y la distancia D. Ésta se obtiene tal y como se muestra en la Figura 7-3.

Esa distancia d es equivalente a la nombrada "distancia de cruce", y si no se puede cumplir geométricamente, habrá que emplear restricciones a la velocidad de los vehículos de la vía principal.

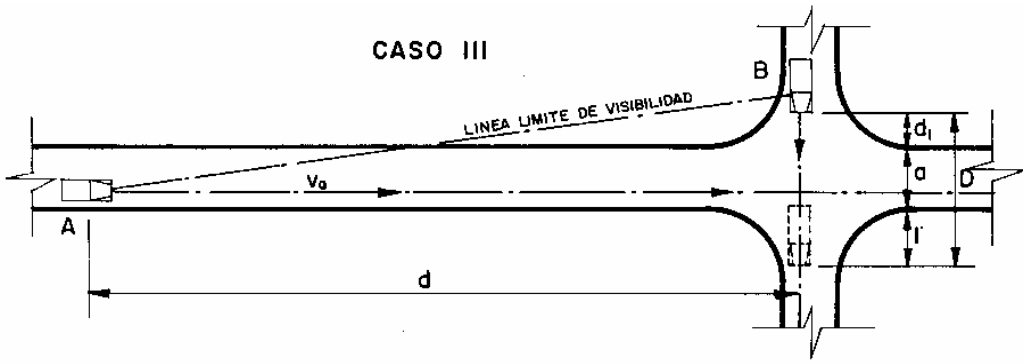


Figura 7-3. Esquema del caso III de los triángulos de visibilidad

7.3 Normativa en EEUU

7.3.1 Distancia de visibilidad de parada

La visibilidad es la longitud de la carretera que es visible al conductor. El mínimo de visibilidad es la que permite al conductor, circulando a la velocidad de diseño, tener el suficiente espacio para detener el vehículo antes de llegar a un obstáculo estacionario sobre la carretera.

Se compone de dos sumandos: la distancia de reacción y la distancia de frenada.

La distancia de reacción es un tiempo circulando a la velocidad de diseño, que es igual al tiempo de reacción. Dicho tiempo es difícil de determinar y varía mucho de una situación a otra. Para estímulos sencillos, esperables, y usuarios en situación de alerta, la respuesta es casi inmediata. Hay muchos estudios sobre el tema, que han llegado a diferentes conclusiones.

En este texto se basan en un estudio que da 0,64 segundos como tiempo de reacción medio para situación de alerta. Otro estudio indica que para sucesos inesperados, hay que sumar 1 segundo. Con el fin de tener en cuenta que sea suficiente tiempo para todos los conductores en la gran mayoría de las situaciones, adopta 2,5 segundos.

Para la distancia de frenado, adopta un modelo de deceleración uniforme. La distancia depende de la velocidad inicial y de la deceleración. En versiones iniciales del libro, la deceleración se toma proporcional a un coeficiente de fricción rueda-pavimento. Los valores de fricción son razonablemente bajos, para quedar del lado de la seguridad para todo tipo de neumáticos, en pavimentos mojados o deteriorados. En las últimas versiones, se indica directamente la magnitud de deceleración asumible: 3,4 m/s^2.

7.3.2 Distancia de visibilidad de decisión

Esta distancia es la necesaria para realizar maniobras más complejas que la simple parada de emergencia. Es la distancia necesaria para detectar un obstáculo inesperado y difícil de percibir, y realizar una maniobra evasiva, no necesariamente una frenada de emergencia. También es preciso utilizar esta distancia de decisión para intersecciones, lugares con maniobras complejas, cambios de sección transversal, áreas con muchos elementos de distracción en el entorno.

Indica valores aproximados que varían entre 1,5 y 3,0 s para la fase de detección y reconocimiento del peligro. Se requieren otros 4,2 a 7,0 s para decidir el tipo de maniobra evasiva. La propia maniobra puede acarrear unos 4,5 s si se trata de un cambio de carril. Esto resulta en unos 12 s, en los cuales el vehículo circula a una velocidad cercana a la de diseño, aunque, dependiendo del caso, sería razonable pensar que además de cambiar de carril, se produce una cierta deceleración.

7.3.3 Visibilidad en intersecciones

Dotar la intersección de una adecuada visibilidad permite evitar una gran parte de los accidentes y conflictos que se producen en ella. La distancia de visibilidad debe ser tal que ambos usuarios de la vía puedan percibirse con tiempo suficiente como para evitar una colisión.

Se presentan dos versiones de los modelos: la que apareció en la edición de 1984 del "Green Book" y la que se presentó en la edición de 2001.

<u>Intersecciones sin prioridad</u>

Se trata de una intersección poco usual: no hay señalización de prioridad. En el modelo de 1984, el diseño se hace pensando en que los dos vehículos circulan a la velocidad de proyecto, se ven, y reajustan su velocidad sin llegar a detenerse, de manera que ambos cruzan la intersección uno detrás del otro. Por ello simplemente da una distancia de visibilidad suficiente para 2 s de tiempo de reacción y 1 s para frenar o acelerar ligeramente (lo suficiente como para evitar la colisión).

Según el modelo presentado en 2001, los vehículos que se aproximan a una intersección no regulada, disminuyen su velocidad inicialmente, incluso aunque no haya otros vehículos que entren potencialmente en conflicto. Lo hacen a una deceleración de 1,5 m/s^2, hasta llegar al 50% de la velocidad media. Llegado a ese punto, si la vía está libre, realizarán la maniobra. Si entonces aparece un vehículo en el campo visual, empezará a decelerar, tras un tiempo de percepción-reacción, que se adopta de 2,5 s (del lado de la seguridad). Frenará hasta detenerse, si es preciso, con ratios de deceleración cercanos a los de la maniobra de frenada: 3,4 m/s^2.

Lo cierto es que la última versión es más adecuada, y más ajustada a la realidad. Los conductores frenan antes de entrar en una intersección pues es un punto peligroso de la red. Luego, si es necesario, son capaces de frenar hasta detener el vehículo.

Maniobra de cruce con "stop"

El conductor de la vía secundaria va a detener su vehículo en cualquier caso (o debería hacerlo). Una vez situado ante la línea vial, debe tener suficiente visibilidad a ambos lados de la carretera para realizar su incorporación o su cruce.

En el modelo de 1984, la hipótesis es que le de tiempo a cruzar mientras un vehículo con prioridad recién aparecido en el campo de visión, circulando a la velocidad de diseño, no llega hasta la intersección. Asume que el vehículo con prioridad lleva velocidad constante, no decelera para facilitar el cruce. El tiempo de cruce lo calcula como el tiempo de percepción del hueco e introducción de la 1ª marcha en la caja de cambios (asumido como unos 2 s), y el tiempo en acelerar y cruzar la carretera.

El primer sumando es el tiempo que transcurre desde que empieza a mirar, hasta que empieza a moverse (si hay hueco suficiente desde el principio). El segundo depende de la relación peso/potencia del vehículo, de la agresividad del conductor, de la pendiente que pueda existir, y del ancho de la carretera principal.

El texto indica un gráfico para calcular distancia recorrida en un tiempo determinado, en función de si la aceleración usada es la máxima posible para el vehículo, o bien una aceleración más moderada. Para turismos, la aceleración "normal" implícita en el gráfico (movimiento uniformemente acelerado) es 1,17 m/s^2, mientras que para camiones "single-unit truck" es de 0,72 m/s^2.

El modelo de 2001 es mucho más sencillo. Introduce el concepto de **hueco crítico**, que es aquél que la mayoría de conductores acepta para realizar la maniobra de incorporación o cruce. Es un intervalo temporal más que suficiente como para que cualquier vehículo se incorpore al tráfico, y acelere sin interferir demasiado en la trayectoria del vehículo con prioridad más cercano. La mayoría de los conductores con prioridad no necesitarían reducir su velocidad más del 70% de la inicial, si los tiempos de hueco crítico son respetados.

Con este concepto, lo único que hay que garantizar es que el vehículo que pretende incorporarse es capaz de ver una distancia igual a la que recorrería un vehículo principal a la velocidad de diseño, durante un tiempo igual al hueco crítico.

El texto defiende que el tiempo de hueco crítico es independiente de la velocidad de la carretera principal. Sólo indica que diferentes vehículos requieren tiempos diferentes. Pero el sentido común nos dice que dicho hueco no es constante y que depende de múltiples factores. Diversos estudios han demostrado relaciones con diversas variables, muchas de ellas psicológicas del propio conductor.

Giro a la izquierda con "stop"

En el texto de 1984 se asume que el vehículo inicia su marcha, realiza el giro, se incorpora a la carretera principal y acelera. Mientras, un vehículo de la vía principal, con preferencia, aparece circulando a la velocidad de diseño, y al ver al recién incorporado, disminuye hasta la velocidad media de la carretera. La situación límite es que ambos vehículos no llegan a alcanzarse circulando a la velocidad media, y queda entre ellos la distancia de seguridad. No llega a especificar cuál es esa distancia de seguridad, ni la magnitud de las deceleraciones y aceleraciones utilizadas. Pero incluye un gráfico que tiene esa información implícita.

También da la posibilidad de dar algo más de visibilidad de manera que ambos vehículos no llegan a alcanzarse, pero la velocidad final de la maniobra es la velocidad de diseño (el vehículo con prioridad no necesita frenar).

En 2001 se mantiene la metodología de hueco crítico presentada para el otro caso, pero cambiando los valores del intervalo temporal a usar.

Giro a la derecha con "stop"

El criterio es similar al caso de giro a izquierda, en el texto de 1984. El vehículo gira, se incorpora, acelera hasta la velocidad media o la de diseño, sin ser alcanzado por el vehículo que viene por la vía con preferencia.

En el modelo con hueco crítico (2001), lo único que cambia es la magnitud del intervalo temporal que aceptan los conductores. Se aceptan huecos 1 s menores que en giros a izquierda.

Intersecciones con "ceda" como prioridad

El modelo de 1984 es muy sencillo. Si no hay vehículos en la vía principal, el vehículo de la secundaria no necesita detenerse. Pero si hay alguno, sí tendrá que hacerlo. Por tanto, una vez más, la visibilidad necesaria es aquella que permite a un vehículo de la secundaria, detenerse antes de alcanzar la intersección, utilizando valores de deceleración moderados (no frenada de emergencia), cuando ve un potencial conflicto con otro vehículo, independientemente de la maniobra que vaya a hacer.

El modelo de 2001 diferencia cada una de las tres maniobras posibles: cruce, giro a izquierda y giro a derecha.

Para el cruce con "ceda", el modelo es similar al cruce sin regulación. La visibilidad necesaria es aquella que permite que el vehículo sin prioridad vaya desde el punto de decisión hasta la intersección, decelerando desde su velocidad de diseño hasta un 60% de la misma. Y luego atraviese la intersección. Se dan valores y fórmulas para calcular esos tiempos.

Lo cierto es que es una situación algo atípica para las carreteras españolas, que suelen presentar "stop" para el cruce y "ceda" para el giro o incorporación.

Si necesita detenerse para ceder el paso, decelerará desde la velocidad de diseño hasta pararse, en el recorrido desde el punto de decisión hasta la intersección.

En el caso de los giros, decelera hasta alcanzar los 16 km/h, desde el punto de decisión hasta la intersección, si ha aceptado el hueco que ha visto. Si tiene que pararse, lo único que cambia es que utiliza valores de deceleración más acusados, para conseguir detenerse antes de alcanzar la intersección.

7.4 Efecto de la oblicuidad

Ambos textos acaban citando la influencia de la oblicuidad en los triángulos de visibilidad: "cuando dos carreteras se cruzan bajo un ángulo menor de 60 grados y no está justificada una rectificación en su trazado para mejorar dicho ángulo, algunos de los factores que determinan el triángulo de visibilidad resultan modificados". Asimismo, ambos textos indican que son aplicables las expresiones de los casos tradicionales, con la salvedad de tener que dividir por el seno del ángulo de la intersección el ancho de los carriles.

El principal efecto originado por la oblicuidad, es que el conductor que se acerca por un ramal, con un movimiento ligero de cabeza puede vigilar los vehículos que se acercan por un cuadrante, pero para vigilar los automóviles del otro cuadrante, es necesario **girar la cabeza considerablemente**, lo cual puede distraer al conductor o serle imposible por sus limitaciones físicas. En la Figura 7-4 y la Figura 7-5 se observan los problemas comentados tanto en su versión de la norma española como la de la AASHTO.

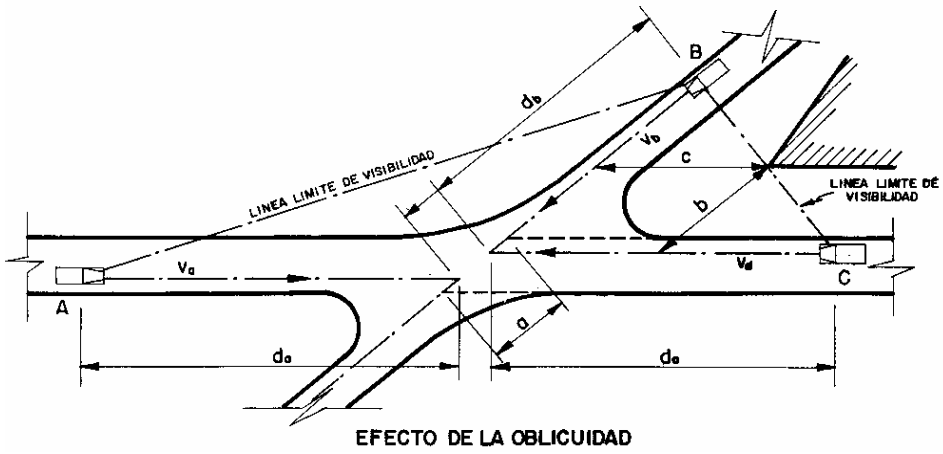


Figura 7-4. Esquema del efecto de la oblicuidad según las "Recomendaciones para el Proyecto de Intersecciones" de la Dirección General de Carreteras

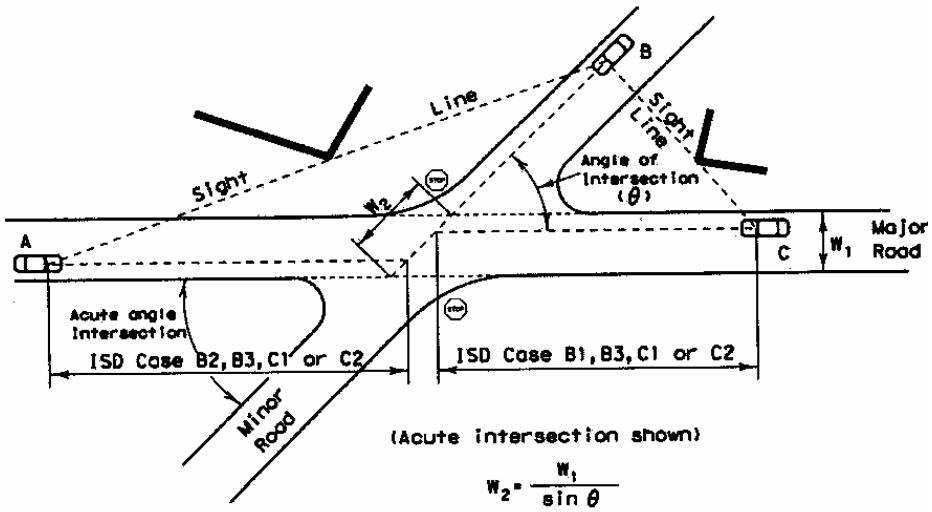


Figura 7-5. Esquema del efecto de la oblicuidad según "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets", de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

7.5 Conclusiones

Según se ha podido comprobar en las anteriores páginas, las diferentes normativas comprueban que el conductor que accede a la intersección desde una vía sin prioridad, tenga la suficiente visibilidad para tomar una decisión acertada.

Un conductor tiene visibilidad de otra vía si es capaz de ver una longitud suficiente de ésta. En la normativa consultada aparecen métodos precisos para calcular cuál es esa longitud, y tienen en cuenta el tipo de vehículo, y el tipo de regulación existente en la intersección.

La oblicuidad se considera que modifica ligeramente los métodos descritos, pero sólo a nivel geométrico: hay una mayor distancia a recorrer en la maniobra, el triángulo de visibilidad no es rectángulo, etc.

Todos estos métodos están orientados a detectar y corregir los problemas de visibilidad originados por obstáculos visuales cercanos a la carretera, tales como edificios, taludes, vegetación,… o bien pérdida de visibilidad debida al trazado. Pero en ningún momento se comenta que la oblicuidad pueda suponer un problema de visibilidad.

8 Visión del conductor

8.1 Introducción

La visión del conductor es una pieza fundamental en el sistema carretera-vehículo-usuario. El elemento activo de este sistema es el conductor. Este agente tiene un objetivo, que puede resumirse en el destino de su viaje, y para llegar hasta él se vale de un instrumento: su vehículo, que circula por una vía. Durante la conducción, el usuario va observando continuamente su entorno, percibiendo información de él, para tomar las decisiones oportunas que le permitan alcanzar su objetivo.

Vemos cómo la percepción del conductor es clave para entender la conducción en su conjunto. Dicha percepción, es, fundamentalmente, visual. Canale y otros (1988) sugieren que el 90% de la información que utiliza el conductor la recibe a través de sus ojos. Aunque también se perciben sonidos y vibraciones, podemos decir que las decisiones tomadas por el conductor dependen en gran medida de lo que perciba a través de sus ojos.

8.2 Capacidades visuales relacionadas con la conducción

La visión es un sentido que las personas usamos mucho para conducir. Pero surge la necesidad de **evaluar la capacidad visual del conductor**, desde diferentes aspectos. Esta capacidad visual podría caracterizarse con una serie de habilidades visuales, que, en conjunto, nos darían el resultado del nivel visual del conductor.

En "Vision Requirements for Driving" (American Academy of Ophthalmology, 1997) indican que las habilidades que necesita un conductor para conducir de manera segura podrían resumirse en:

- Capacidad motora para escanear un entorno rápidamente cambiante.
- Habilidad sensitiva para extraer información de ese entorno.
- Capacidad para procesar diferentes focos de atención simultáneamente.
- Habilidad cognitiva para evaluar la información y tomar las decisiones apropiadas.
- Habilidad motora para llevar a cabo las decisiones tomadas.

La necesidad de evaluar la visión se utiliza en diversos países de todo el mundo con el fin de determinar qué personas son aptas para conducir, y cuáles representan un peligro al volante. Las diferentes administraciones encargadas de la seguridad vial proponen diferentes criterios. A continuación se enuncian los principales aspectos que se analizan, con algún comentario sobre los valores límite recomendados. Son diversos factores, íntimamente interrelacionados, en algunos casos.

8.2.1 Agudeza visual

Éste es el parámetro más fácil de medir, y en muchos países es el único que se exige para obtener la licencia de conducir.

El test consiste en pedir al sujeto que **identifique una serie de letras o signos** escritos sobre un panel a una cierta distancia.

Actualmente no existen investigaciones que demuestren que este parámetro esté íntimamente relacionado con la seguridad vial, mientras que otros parámetros sí se han demostrado. Además, suele exigirse una agudeza visual 20/40, y no existen bases

experimentales para ese requisito. No obstante, se trata de un requisito aceptado a nivel internacional.

En algunos estados de EEUU un conductor puede obtener licencia, aun teniendo una severa limitación en la agudeza visual como 20/100, si demuestra su pericia conduciendo en situaciones reales. De alguna manera, conductores con limitaciones visuales consiguen soslayar esos impedimentos mediante diversas técnicas: una mayor atención, mayor prudencia, giros de cuello más frecuentes y acusados, etc.

8.2.2 Fijación visual

Objetivos posibles

Situados en el punto de vista habitual del conductor, podemos diferenciar varios objetivos visuales.

La **visión frontal**, a través del cristal delantero del vehículo. El conductor es capaz de percibir lo que se encuentra delante de su vehículo, y queda dentro de su trayectoria. Este es un campo de visión que presenta pocos problemas.

La **visión lateral**, a través de los cristales laterales del vehículo. Para poder acceder a ella, el conductor necesita girar su cuello y/o tronco, en cierta medida. Como comentan Bhise y otros (1981), los conductores moverán su cuello unos 5 cm para observar el retrovisor izquierdo, después de haber girado el tronco un cierto ángulo. Al mover la cabeza lateralmente, además de girarla, el conductor consigue un mayor campo visual a través del retrovisor. Este movimiento lateral del cuello se detectó que era superior cuando no hay tráfico en la parte posterior del vehículo. Es decir, el conductor mueve su cabeza más para comprobar que realmente no hay vehículos, ni si quiera en el ángulo muerto. Y la mueve menos si es capaz de ver estos vehículos sin necesidad de estos movimientos (usando el retrovisor central, por ejemplo).

El campo visual que percibe a través de estos cristales es reducido hacia la derecha (si el conductor se sienta en el sillón izquierdo), y es amplio hacia la izquierda. Este campo visual se usa principalmente en cruces. En países como Reino Unido y Japón, donde los conductores van situados en el sillón derecho, estas afirmaciones también son válidas, pero a la inversa.

La **visión reflejada a través de los espejos retrovisores**. Todo vehículo irá provisto de un retrovisor interior o central, que permite una visión general de la parte posterior del vehículo. Y de uno o varios retrovisores laterales, que permiten visión en la parte posterior y lateral.

Taoka (1990) indica que las miradas al retrovisor izquierdo y al retrovisor central interior son más frecuentes que las realizadas al retrovisor derecho. En efecto, este retrovisor no era obligatorio en los automóviles hasta hace poco tiempo.

Duración

Como comenta Rasmussen (1993), la visión del conductor suele estar centrada en su trayectoria, en la zona frontal del vehículo. No obstante, **la visión salta de un punto hacia otro** de manera natural, motivada por estímulos de compleja interpretación psicológica, o bien por mero azar. Durante la conducción habitual, la visión del sujeto puede saltar de un lugar a otro en intervalos que varían entre 100 ms y 350 ms. Este intervalo depende mucho del nivel de fatiga y de la concentración del individuo.

Sobre este tema también escriben Finnegan y Green (1990). La fijación del objetivo de la mirada del conductor tiene una media y una distribución típica de 300 ms, y

se distribuye según una log-normal. El movimiento de los ojos para cambiar la fijación visual dura unos 50 ms, y es previo al movimiento del cuello y torso.

Para Mourant y otros (1969), el tiempo de fijación visual es de 290 ms, y una gran parte del tiempo (36%) es mirando hacia delante.

Robinson y otros (1972) anotan que la mirada hacia la parte posterior del vehículo, girando completamente el torso y el cuello, es una actividad de alto riesgo, puesto que su duración mínima es de 0,8 s. Durante ese tiempo, el conductor no percibe lo que tiene delante, sobre su trayectoria.

Bhise y otros (1981) indican que las miradas hacia el retrovisor se hacen más largas (250 ms más) cuando hay tráfico en la parte posterior. El conductor se mantiene más tiempo observando el retrovisor para comprobar el comportamiento de los conductores que le siguen, mientras que apenas realizará vistazos cortos si no ve vehículos que le sigan.

Necesidad

Estos mismos autores (Bhise y otros, 1981) detectaron la presencia de "**estilos de observación**". Un mismo conductor suele seguir un mismo esquema de observación, con unas pautas predefinidas de frecuencia de cambio de objetivo, duración de mirada, etc. Este estilo de observación no se ve afectado por las condiciones del tráfico o el entorno. Es propio de cada individuo, por lo que puede variar mucho de unos a otros.

Lee y otros (2004) comentan que muchos autores están de acuerdo en que existen patrones de observación. Hay una íntima relación entre el tipo de maniobra que el conductor intenta realizar y el tipo de miradas que hace, así como el orden de las mismas. Por ejemplo, antes de realizar un cambio de carril a izquierda, hay una alta probabilidad de que el conductor mire hacia delante, para después comprobar mirando hacia atrás por su retrovisor izquierdo.

Analizaron las miradas que los conductores realizan en los 3 segundos anteriores a iniciar una maniobra de cambio de carril. Esta información está recogida en la siguiente tabla. Por ejemplo, podemos ver que las miradas por el retrovisor central tuvieron una duración media de 0,65 s. La probabilidad de que dicha mirada se produjera en esos 3 s, al menos una vez, fue de 52%.

Objetivo de la mirada	Duración media de la mirada (segundos)	Probabilidad de aparición en los 3s anteriores a t_0.
Delante	0,90	1,00
Ventana izquierda	0,61	0,23
Retrovisor izquierdo	0,68	0,39
Ventana derecha	0,65	0,11
Retrovisor derecho	0,60	0,08
Retrovisor interior	0,65	0,52

Tabla 8-1. Duración y frecuencia de aparición de miradas durante un cambio de carril

Estos datos pueden compararse con los de Finnegan y Green (1990). De media, durante un cambio de carril, los conductores realizan 2,5 miradas, cada una de las cuales duran entre 1,0 y 1,5 s. El tiempo total (mínimo) de observación del tráfico, antes de realizar un cambio de carril, es de 3,7 s si no hay tráfico, o de 6,1 s con tráfico. En cualquier caso, estos tiempos dependen mucho de la experiencia del conductor.

8.2.3 El campo visual

Según Canale y otros (1988), al menos el 90 % de la información que utiliza el conductor para guiar su vehículo la percibe a través de sus ojos. Estos autores destacan que, de cara a la conducción, adquiere una gran importancia el campo de visión, ya que éste solo es nítido en una pequeña zona, aunque la **visión periférica** llega a cubrir un ángulo de 120º. También comentan que la amplitud del campo de visión va relacionada con la velocidad del vehículo, ya que al acelerar, el conductor comienza a fijarse en los objetos que tiene más lejos, como se expresa en la figura.

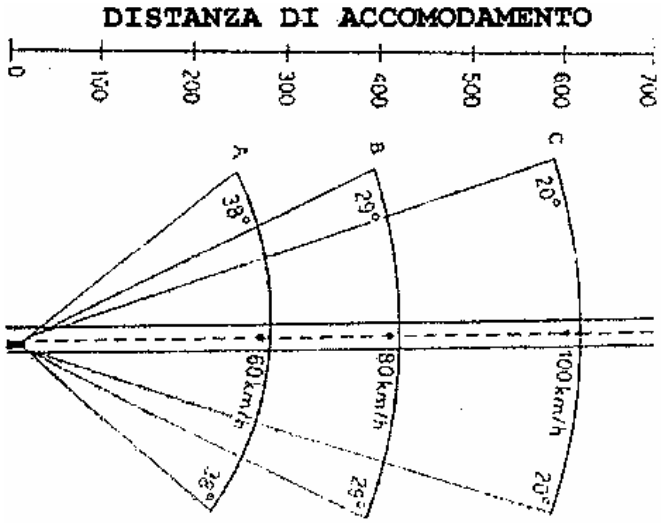


Figura 8-1. Relación entre el campo de visión y la velocidad.

Aberg y Rumar (1975) estudiaron el campo de visión del hombre y concluyeron que éste es tan importante como los **movimientos de cabeza** necesarios para la conducción. Sin mover los ojos, una persona posee un campo de visión de 20º o 30º, denominado **campo de visión focal**. Se puede ampliar a 80º o 90º si se permite el movimiento de los ojos. Si se desean obtener campos de visión mayores, es necesario girar la cabeza. Tras analizar el comportamiento de varios conductores, los autores del estudio establecieron que los conductores mueven la cabeza como máximo 83º a la izquierda y 26º a la derecha, en total, un movimiento de 109º. Empleando adecuadamente los ojos y la cabeza, **los conductores llegaron a cubrir un ángulo de 180º**, aunque esto se cumple en un espacio ideal. Las obstrucciones en el campo de visión, tales como los propios elementos del vehículo, pueden limitar esta posibilidad, lo cual debe ser evitado para no perder capacidad de absorción de información por parte del conductor.

Volviendo al diagrama del campo de visión del conductor, señalaremos que esta amplitud del campo visual se corresponde con el sector circular amarillo, la visión frontal directa. En este diagrama aparece reflejado un campo visual superior a 180º.

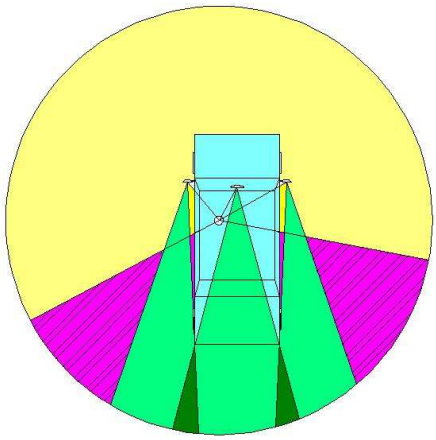


Figura 8-2. Campo visual del conductor

Hubo autores que no encontraron **relación entre el campo visual y los accidentes**, pero en 1983 Johnson y Keltner midieron el campo visual de 10000 sujetos y lo compararon con los accidentes sufridos durante los últimos años. Se encontró que los conductores con visión monocular poseían proporciones de accidentes equivalentes a la media, mientras que sujetos con pérdida de campo visual tenían proporciones de accidentes del doble o más que los conductores con visión normal. Además, también se pudo comprobar la pérdida de campo visual con la edad, ya que el porcentaje de sujetos con problemas era del 3 al 3,5 % en personas entre 16 y 60 años y del 13 % para mayores de 65 años. Los autores, además percibieron que al menos la mitad de las personas con pérdida de campo visual no eran conscientes de su problema, así que ya se aludió a la necesidad de testar esta capacidad en las revisiones periódicas.

En cuanto a los **mínimos de visión que imponen las autoridades** a los conductores en las "Federal Motor Carrier Safety Regulations" de EEUU, los mismos autores citan que las autoridades federales exigen "un campo de visión de 70º al menos en el meridiano horizontal en cada ojo", prohibiendo además que los conductores con visión monocular conduzcan vehículos comerciales. Esta cita incluye un error, ya que en ediciones anteriores se exigían 140º de campo visual, pero no se debe sumar los campos visuales de los dos ojos, así que lo correcto según la FHWA es exigir un campo visual de 140º en cada ojo. Según North (1985), las recomendaciones en UK son de un campo de visión mínimo de 120º, lo cual está acorde con las exigencias de las directivas de la UE.

Según Horton y Chakman (2002), en Australia cualquier conductor con la sospecha de poseer un defecto en el campo de visión debería ser examinado por un experto oculista u oftalmólogo. Los campos de visión necesarios son:

- Los conductores privados deberían tener como mínimo un campo de visión de 120º en el sentido horizontal y de 20º en el sentido vertical, sin sufrir reducciones que afecten a la conducción.
- Los conductores de vehículos comerciales deberían poseer un campo de visión de al menos 140º en el sentido horizontal y de 20º en el sentido vertical, sin sufrir reducciones que afecten a la conducción.

8.2.4 Visión periférica

Al igual que Canale y otros (1988), Avallone y Wood (1997) también comentan que existen **dos visiones**:

- la visión focal, y
- la visión de ambiente o periférica.

La visión de ambiente incluye todo el campo visual y presenta una resolución baja, pero es muy sensible a los cambios de luminosidad y al movimiento. Por otra parte, la visión focal funciona mejor en la zona central de la visión, y es la que proporciona la percepción de las formas y los colores, afectándole en mayor medida la falta de luz, de modo que resulta de ayuda limitada durante la conducción nocturna. Así, la mayoría de información que recibe el conductor es a través de la visión focal, pero la de ambiente proporciona la capacidad de reaccionar ante imprevistos que aparezcan en la periferia de la visión, como es el caso de un coche que surja del "ángulo muerto" del vehículo. Pese al conocimiento de estos aspectos, los análisis visuales tradicionales sólo sirven para evaluar la visión focal, así que es necesario buscar modos de analizar el estado de la visión de ambiente en cada conductor.

La presencia de dos tipos de visión diferenciados (focal y periférica) tiene su **base fisiológica**. En el interior del ojo existen dos tipos de receptores ópticos: conos y bastones. Los conos están concentrados en la parte central de la retina, requieren altos niveles de luz, pero permiten una visión detallada, con una gran agudeza visual para diferenciar el color. Son los principales receptores usados en el proceso de la percepción. Por otro lado, los bastones son mucho más numerosos, y están localizados alrededor de la retina. Trabajan bien tanto con baja iluminación como con alta, tienen gran sensibilidad frente al movimiento, pero apenas diferencian los colores.

Durante la conducción, los bastones, es decir, la visión periférica, se encarga de la tarea de mantener la trayectoria deseada y la percepción de la velocidad. Mientras tanto, los conos, es decir, la visión focal, se encarga de la identificación y reconocimiento de objetos peligrosos y de las señales de información relevante que se presentan ante el conductor.

Los conductores, para detectar peligros fuera de su campo visual directo, **usan conjuntamente la visión periférica con la rotación del cuello**. Por tanto, sujetos con limitaciones en la visión periférica no tienen por qué sufrir una seria limitación en sus habilidades pues pueden ser capaces de compensarlas con giros de la cabeza más pronunciados y más frecuentes.

8.2.5 Test visual UFOV

El Smith-Kettlewell Eye Research Institute (ver Brabyn y otros 1994) desarrolló un dispositivo para medir estáticamente el campo visual, y Hennessy lo usó para examinar la relación entre accidentes y campos de visión. Sus primeros estudios no hallaron una clara relación, pero el mismo investigador realizó alguna modificación de modo que los campos de visión se midieran durante condiciones de atención dividida, lo que permitió hallar mayores relaciones entre los accidentes y los resultados de estos tests.

En este sentido se desarrolló un test de visión llamado "Useful Field of Vision" (UFOV) o **"Test de Campo Visual Útil"**. Está basado en la idea de que la conducción incluye procesar información del centro y de la periferia del campo visual (Ball y Owsley,

1993; Ball y otros, 1993; Owsley, 1994; Pauzié y Gabaude, 1995). Pese a las múltiples variaciones, el test más usado es el "UFOV Visual Attention Analyser, Model 2000, Visual Resources Inc., Boewling Green, KY" basado en el estudio de Sekuler y Ball (1986). La primera fase del test consiste en identificar un objetivo situado en el centro de una pantalla (silueta de un camión o un coche). En la segunda, se debe detectar, al mismo tiempo, un estímulo en la periferia (silueta de otro camión o coche) que se puede encontrar en 24 posiciones (8 direcciones y 3 posibles desplazamientos radiales creados por ángulos de 10, 20 o 30 grados). La dificultad se eleva en una tercera fase del test empleando elementos distractorios como triángulos en la periferia de la pantalla. Se puede ver un ejemplo de lo que observa el sujeto durante el test en la Figura 8-3.

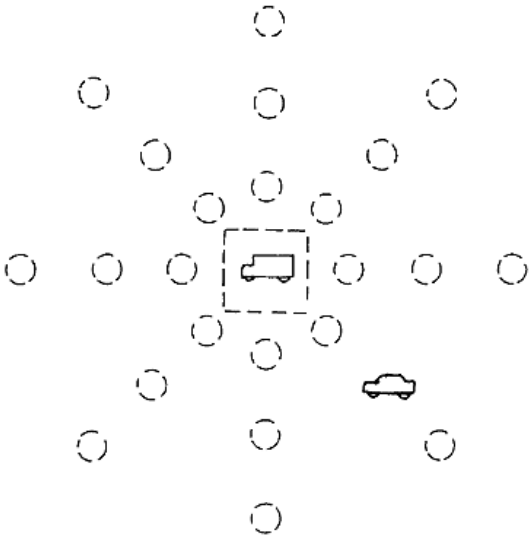


Figura 8-3. Visión del sujeto durante el UFOV test.

El test UFOV está basado en la división de la atención del conductor entre la visión central y la periférica, y si éste no es capaz de conseguir los objetivos, la probabilidad de verse envuelto en un accidente crece. Ball y otros (1993) reunieron un grupo de 294 sujetos con una proporción considerable de sujetos con accidentes en los últimos 5 años, y comprobaron que este test es más claro que los de agudeza visual, sensibilidad al contraste, "stereopsis", discriminación del color u otros a la hora de descubrir los sujetos con mayor número de accidentes, como se puede observar en la figura.

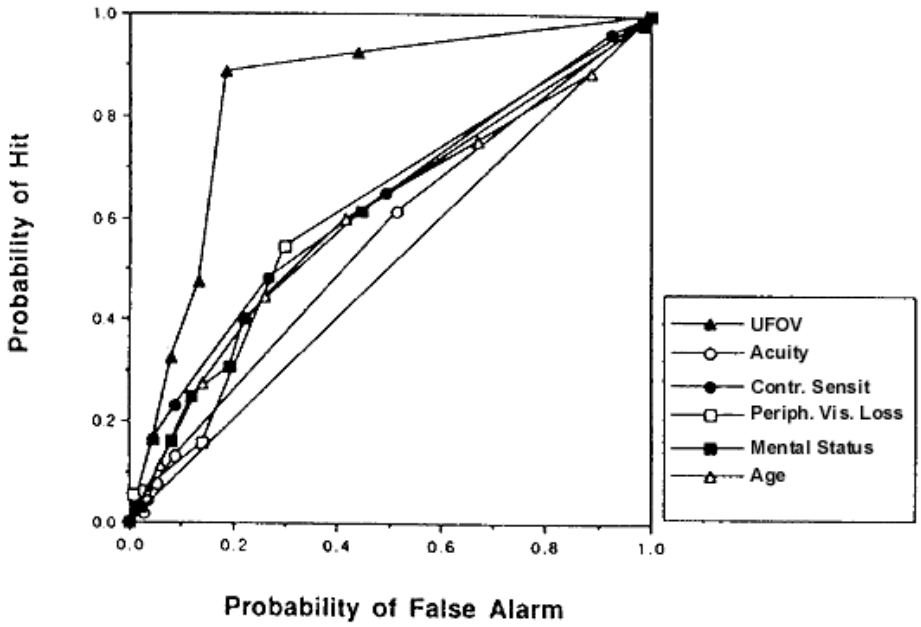


Figura 8-4. Efectividad de los tests para discriminar a sujetos con probabilidad de sufrir accidentes basándose en los accidentes sufridos.

Al analizar los datos, Ball y otros (1993) descubrieron que si se ordenaban los sujetos en función de su puntuación en el UFOV, los que se quedaban en la mitad "mala" (habían obtenido un campo visual reducido) tenían 4,2 veces más probabilidades de sufrir un accidente en los últimos 5 años que el resto. Además se analizaron los accidentes según la tipología, obteniéndose que el 67 % de éstos se había producido en intersecciones. Se estudiaron los datos en este sentido y se obtuvo que **los conductores con malos resultados en el test UFOV tenían 15,6 veces más probabilidades de sufrir un accidente en una intersección que el resto**.

Ball y otros (1993) proponen el UFOV como discriminatorio de cara a los análisis visuales para las licencias de conducción, ya que dado un sujeto envuelto en un accidente, la probabilidad de fallar el test era de 0,89, mientras que un sujeto que no hubiera sufrido ningún accidente tenía una probabilidad de aprobar el test de 0,81.

Tanto Ball como Owsley repitieron los análisis obteniendo resultados similares con muestras mayores de sujetos. Estos autores han comentado que, con un cierto entrenamiento, se pueden mejorar los resultados en el test, aunque todavía no se ha comprobado si ello reduce el número de accidentes. De todos modos, **los conductores deberían conocer sus limitaciones** para controlar la conducción (evitar situaciones complejas, conducir pocos kilómetros o conducir de día en la medida de lo posible), ya que conocer sus limitaciones llevaría a los conductores a sufrir un menor número de accidentes. Además, varios autores han reconocido que la pérdida del campo visual va relacionada con la edad; por lo tanto, los conductores mayores deben atender con mayor razón a estas observaciones.

La compañía aseguradora Hartford, junto con la AARP (American Association of Retired Persons) financiaron un estudio (Brown y otros 1993) sobre varios tests visuales y sus correlaciones con los accidentes, hallando que el UFOV no era el mejor indicador (aunque sí se observó una correlación estadística significante), sino que lo era la **sensibilidad al contraste**. Por ello, lo que se puede extraer de aquí es que los dos tests son válidos y necesarios para analizar la visión de un futuro conductor.

Se ha especulado que otros tests como el MOMSSE (Matis Organic Mental Status Síndrome Examination) que valora la magnitud de la demencia relacionada con la edad, o el LISREL han obtenido correlaciones con los accidentes similares a las obtenidas con el UFOV, pero no se han confirmado estas afirmaciones.

8.2.6 Habilidad motora ocular

Es bien conocido que los conductores deben poder recorrer con su mirada la carretera y sus alrededores, en busca de todo tipo de información útil. Para ello utilizarán el movimiento de los ojos, junto con el movimiento del cuello y tronco.

Los conductores que tengan una escasa movilidad del ojo podrían tener serios problemas en la conducción si no disponen de una suficiente capacidad motora en el cuello que compense esta deficiencia.

8.2.7 Defectos en la visión central

Los oftalmólogos denominan a estos defectos como escotomas centrales, de los cuales, los más habituales son el mal de Stargardt y distrofias de los conos. Una vez más, los sujetos que las sufren son capaces de aprender algunas técnicas compensatorias, como utilizar más su visión periférica. Aun así, estos sujetos deberían limitar su conducción a las horas de sol.

8.2.8 Sensitividad al contraste

El ojo debe ser capaz de percibir formas sobre un fondo y diferenciarlas de él, para poder identificarlas. El contraste entre el fondo y el objeto es clave para una mejor percepción del mismo.

Un tipo de desorden visual que algunos pacientes tienen es la reducción en la **capacidad de percibir objetos con poco contraste sobre un fondo**. Estos sujetos suelen tener más dificultades para identificar objetos en la oscuridad (cuando tanto el fondo como el objeto no están iluminados directamente). Durante la conducción, este tipo de situaciones no suele darse con frecuencia, puesto que de noche, los faros del vehículo iluminan cualquier obstáculo potencial que se encuentre sobre la calzada, diferenciándolo del fondo (no iluminado).

Hay pocos estudios que relacionen este defecto visual con una mayor proporción de accidentes, pero se cita en algunos artículos. Para mitigar este defecto, el paciente evitará conducir entre la puesta y la salida del sol. Así mismo, filtros oculares de color amarillento (situados sobre las gafas) pueden mejorar el contraste.

8.2.9 Deslumbramiento

Aunque muchas administraciones examinan la **resistencia al deslumbramiento** de los conductores en las revisiones médicas, no hay estudios que permitan relacionar directamente este aspecto con una mayor proporción de accidentes.

Durante la conducción, la situación más habitual de posible deslumbramiento se da por la noche, durante el cruce con otro vehículo de sentido opuesto. Pero también al amanecer y al anochecer, si el sol está bajo y en la dirección visual de la carretera.

Para evitar el deslumbramiento por otros vehículos, los conductores intentan no mirar fijamente los faros del vehículo opuesto. Para evitar el deslumbramiento por el sol, los conductores usan gafas de sol y los parasoles que incorporan todos los vehículos.

8.2.10 Percepción del color

El color se usa para diferenciar algunas **señales de tráfico** entre sí. Por lo demás, usuarios con problemas de detección de los colores pueden conducir sin serios problemas. Algunos estudios han demostrado que estos conductores son igual de seguros que otros con buena percepción de los colores, por lo que este aspecto no debería incluirse en las evaluaciones médicas de aptitud para la conducción.

8.2.11 Visión monocular

El ser humano posee dos ojos que constituyen el órgano visual primario. El hecho de que sean dos, y no sólo uno, permite la **percepción de la distancia** o profundidad en el campo visual. El cerebro, al superponer las señales recibidas por cada uno de los ojos, es capaz de extraer una información que no está explícitamente recogida: que es la distancia a la que se encuentra el objeto observado.

Existen personas con serias deficiencias de visión en un ojo, por lo que, en la práctica, perciben el mundo a través del otro ojo. Estas personas, sentadas frente al volante, pueden tener serios problemas para calcular la distancia a la que se encuentran otros objetos de la carretera, así como otros vehículos. Aunque existen técnicas para mitigar esta restricción (como servirse de objetos intermedios que estén a distancias conocidas, por ejemplo, los hitos laterales) no siempre son aplicables.

Johnson y Keltner (1983) estudiaron 10000 conductores. Se midió el campo visual, y se investigaron los accidentes sufridos por éstos en los últimos 3 años. Se encontró que los conductores con visión monocular tenían índices de accidentalidad similares a los conductores normales. Sin embargo, conductores con visión bifocal, pero con un campo visual limitado llegaban a tener el doble de accidentes que los conductores con campo visual normal.

8.3 Experimento con conductores con limitaciones visuales

Un ejemplo de estudios que relacionan la pérdida de visión con una pérdida en las habilidades de conducción es el desarrollado por Troutbeck y Wood (1992). Estudiaron los efectos de una restricción del campo visual total, concretamente, una **limitación en la visión periférica**; así como la **pérdida de visión bifocal**, intentando analizar el comportamiento de conductores monoculares.

Simularon defectos en el campo de visión de conductores mediante unas gafas de nadador agujereadas adecuadamente, como se puede ver en la Figura 8-5 y los sujetos, en estas condiciones, condujeron un vehículo en un circuito cerrado para comprobar la variación en el comportamiento durante la conducción.

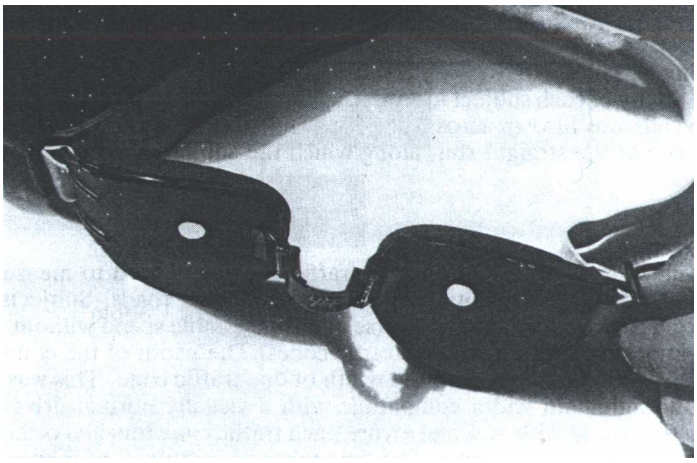


Figura 8-5. Gafas para disminuir el campo visual.

Los autores analizaron el comportamiento de los conductores en tres situaciones de visibilidad: visión monocular (se tapó el ojo derecho por considerar que la pérdida era mayor), campo de visión de 40 grados y campo de visión de 20 grados. Durante el trayecto, se midieron los tiempos en realizar las maniobras y trayectos y se otorgaron puntos por cada error cometido. Los sujetos debían percibir señales que se encontraban a lo largo del recorrido, evitar obstáculos, detener el vehículo rápidamente (para medir la distancia de parada), maniobrar a través de unos conos, realizar cambios de sentido y permanecer centrado en su carril.

En la Figura 8-6 se puede ver la media de errores en la detección de las señales situadas a lo largo del recorrido tanto en la situación de visión monocular como en los casos de campo de visión de 40 y 20 grados, respecto a la línea de base que muestra la situación con una visión normal. Se asignó un error por cada señal que no se percibiera.

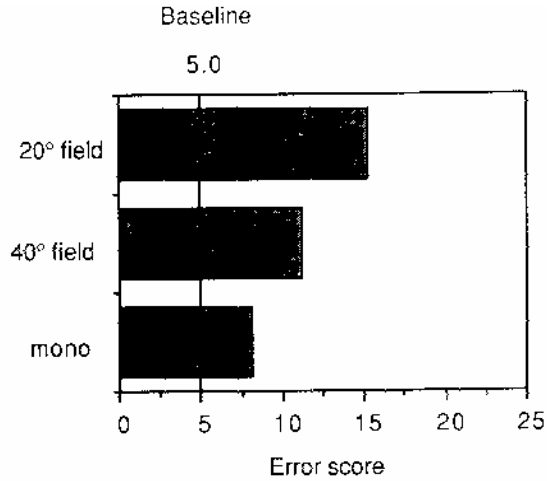


Figura 8-6. Errores en la detección de señales de tráfico, según el campo visual del conductor

Se aprecia que la reducción del campo visual impide al conductor percibir elementos que se encuentren en la periferia de su visión como podría ser otro coche o un viandante. En la Figura 8-7 se muestra la puntuación media de errores al tratar de evitar obstáculos durante la conducción. Por cada cono derribado se contabilizó un error. Se nota la reducción del campo visual de cara a esquivar los obstáculos, y ello es posible que

sea debido a que los conductores estaban muy pendientes de la periferia y poco de los posibles obstáculos frontales.

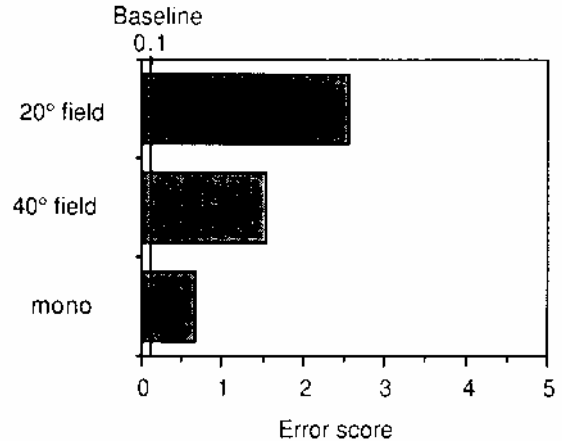


Figura 8-7. Errores al evitar obstáculos en la carretera, según el campo visual del conductor

En la Figura 8-8 se puede observar la media de velocidades durante el trayecto. Cabe notar que en todos los casos ésta es cercana a los 60 Km/h. porque se instruyó a los conductores para que circularan a esta velocidad. Se percibe que no existen diferencias claras entre las velocidades adoptadas por los sujetos en las diversas limitaciones del campo visual. Esto es posible que se deba a que, aparte de la visión espacial, los conductores pueden percibir la velocidad por la vibración o el ruido del coche.

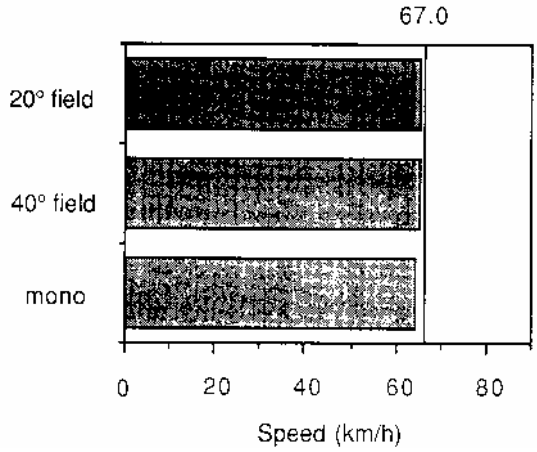


Figura 8-8. Velocidad adoptada, en función del campo visual del conductor

En la Figura 8-9 se contempla la media de distancias de parada en las tres condiciones de visibilidad respecto a la visión normal, las cuales no expresan diferencias claras ni resultados lógicos ni indicativos de ninguna conclusión.

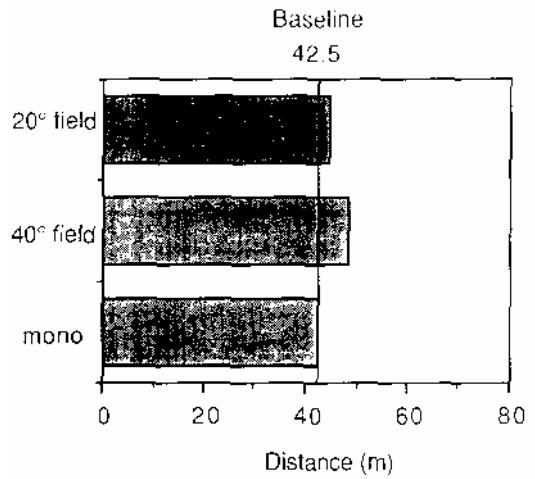


Figura 8-9. Distancia de parada, en función del campo visual del conductor

En la Figura 8-10 se observa la media de errores durante las maniobras efectuadas por los conductores entre los conos, mientras que en la figura siguiente (Figura 8-11) se expresan los tiempos empleados en realizar las maniobras entre los conos. Estos datos expresan que hay diferencias significativas en cuanto a los errores cometidos al reducir el campo visual, pero no existen grandes diferencias en cuanto a la condición monocular. Sin embargo, en cuanto al tiempo empleado, las diferencias son mínimas en ambos aspectos.

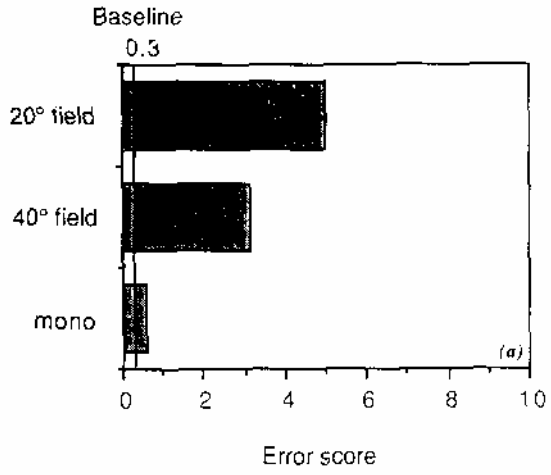


Figura 8-10. Errores en la maniobra entre conos, según el campo visual del conductor

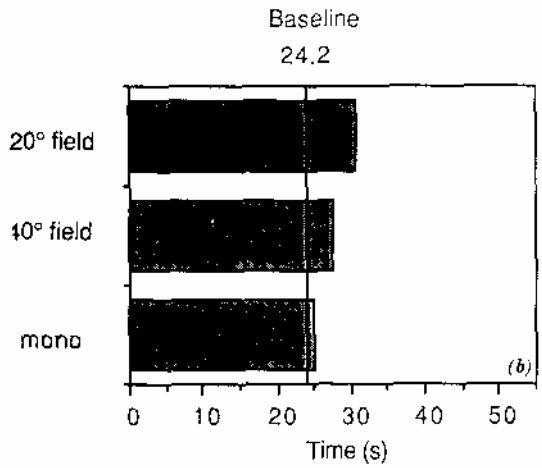


Figura 8-11. Tiempo invertido en la maniobra entre conos, según el campo visual del conductor

En la Figura 8-12 se pueden ver los resultados de las medias de errores durante los cambios de sentido. El examinador consideraba las maniobras de buenas a malas asignando errores de 1 a 5 puntos respectivamente. Al analizar los resultados se puede concluir que la reducción del campo visual afecta a la capacidad para realizar cambios de sentido, y sin embargo, pasar de 40 a 20 grados de campo visual no altera el comportamiento posterior.

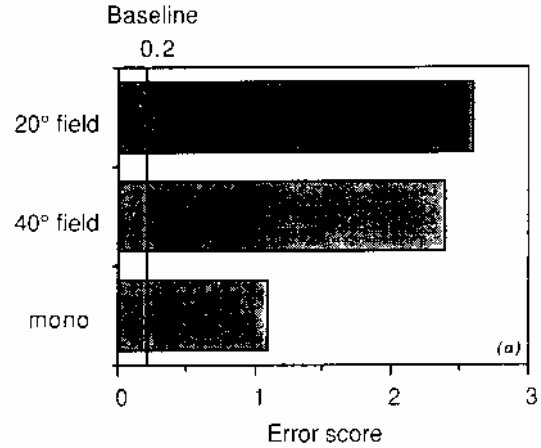


Figura 8-12. Errores en cambios de sentido, según campo visual del conductor

En la Figura 8-13 se aprecian los tiempos invertidos es realizar los cambios de sentido, sin que se perciban grandes diferencias ante las reducciones del campo visual.

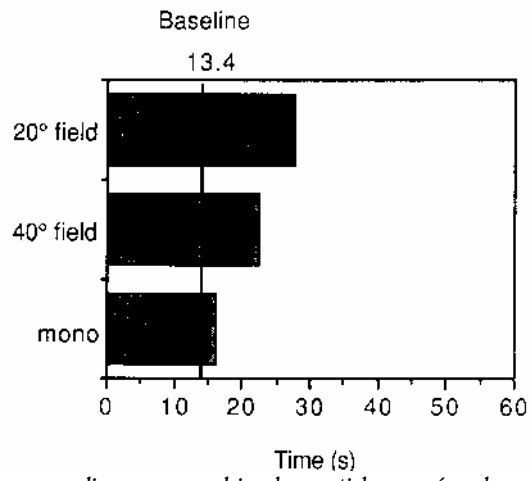


Figura 8-13. Tiempo en realizar un cambio de sentido, según el campo visual del conductor

En la Figura 8-14 se recoge la media de errores para el posicionamiento del vehículo, donde influyó claramente la reducción del campo visual, ya que los conductores cruzaron las líneas de delimitación de los carriles más a menudo. Para las puntuaciones, el examinador otorgó puntos de 1 a 5 en función de que el posicionamiento había sido bueno o malo respectivamente.

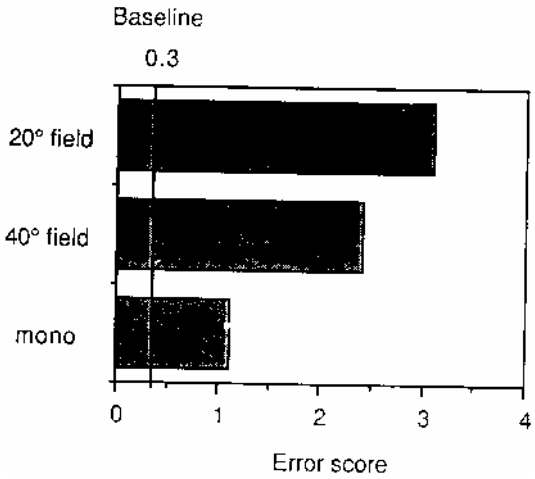


Figura 8-14. Errores en el centrado del vehículo, según el campo visual del conductor

En la Figura 8-15 se aprecian los tiempos medios que tardaron los conductores en completar el circuito. Como se puede ver, ante la restricción a un campo visual de 20 o 40 grados sí hubo diferencia respecto a la situación inicial, pero en la visión monocular el aumento del tiempo no resultó significativo según los tests estadísticos realizados.

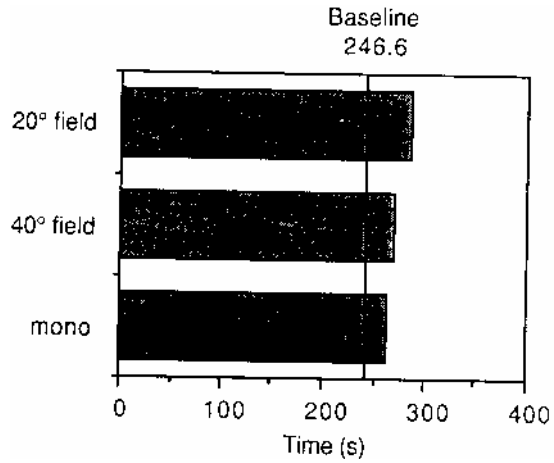


Figura 8-15. Tiempo en completar un circuito, según el campo visual del conductor

Si a los tiempos medios totales se les suman las puntuaciones medias de los errores, se pueden valorar conjuntamente todos los aspectos de la conducción, concluyendo que los conductores conducen de forma significativamente peor ante una reducción del campo de visión a 40 o 20 grados, pero no al pasar a una visión monocular, como se puede observar en la Figura 8-16.

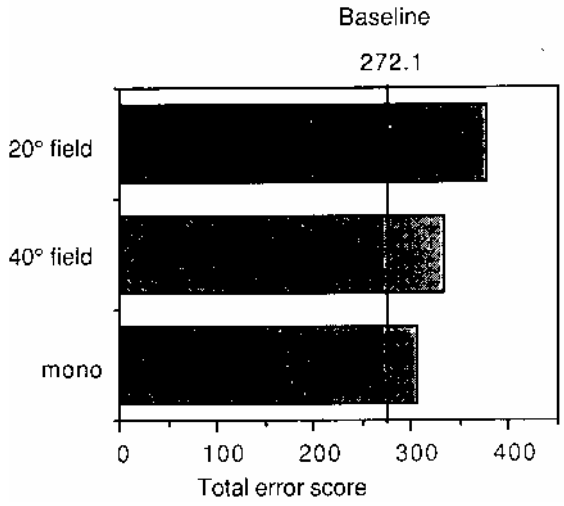


Figura 8-16. Puntuación total para diferentes campos visuales

La primera **conclusión** que se extrae de este estudio es que, empleando análisis ANOVA, se pudo comprobar que los conductores que poseen visión monocular no realizan una conducción apreciablemente diferente respecto a los conductores normales, mientras que los conductores con el campo de visión reducido experimentaron problemas significativos al percibir señales de tráfico, evitar obstáculos en la carretera, realizar maniobras entre conos y en el tiempo total de conducción. Sin embargo, hay que considerar que los conductores que sufran estos problemas realizarán una conducción considerablemente mejor que la aquí expresada, ya que habrán experimentado una progresiva adaptación a la situación, la cual no ha sido posible para los sujetos del experimento. En general, se reconoce que estos conductores se adaptan realizando mayores movimientos del cuerpo, no conduciendo de noche, conduciendo menos horas y reduciendo su velocidad. Es por ello que en algunos estudios no se ha obtenido una correlación clara entre la pérdida de campo visual y los accidentes sufridos.

De todos modos, la obligación de los diseñadores de carreteras reside en considerar que estos conductores cada vez serán más frecuentes (ante el envejecimiento de la población) y sus derechos a la conducción deben preservarse. Por lo tanto, se deben cuidar aspectos como multiplicar los puntos de información, para que ésta sea redundante, pero separarla en espacio y tiempo para que pueda ser asimilada correctamente.

8.4 Conclusión

La visión es muy importante para la conducción. El buen conductor, necesita percibir todo tipo de información a través de la vista, para procesarla y tomar las decisiones correctas. Una mala visión puede provocar decisiones incorrectas, tomadas con tiempo insuficiente, o incluso ausencia de decisiones (si no se percibe la información).

Pero **evaluar la buena visión** de una persona es difícil, puesto que la capacidad visual de la misma puede disgregarse en diversas aptitudes medibles. No existe un test universal y general que permita decidir si un sujeto ve bien o no. Por tanto, el técnico encargado de la revisión debe evaluar las aptitudes del paciente de una manera global: mediante un conjunto extenso de chequeos, detectar cuáles son las deficiencias del individuo, si las hay. Estos chequeos deben incluir las habilidades motoras, cognitivas y visuales del conductor.

Si el conductor se desenvuelve bien en todos los chequeos, la habilidad para la conducción puede considerarse normal. Si el conductor falla en alguno, una evaluación más profunda se hace necesaria. El individuo debería tener la oportunidad de aprender técnicas para mitigar sus propias limitaciones. En última instancia, sólo una demostración real en la carretera, permitiría evaluar la aptitud del conductor.

La licencia de conducción es un privilegio, más que un derecho. No debe ser concedida indiscriminadamente. Sin embargo, en una sociedad en la que el uso del vehículo propio es la principal forma de transporte, la denegación de una licencia puede tener serias consecuencias sobre la calidad de vida del ciudadano.

9 Campo visual del conductor en el vehículo

9.1 El ángulo muerto

9.1.1 Definición

El conductor es capaz de observar por visión directa una gran parte de los alrededores de su vehículo, especialmente desde su posición hacia delante. Esta área incluye lo que ve a través de los cristales laterales del vehículo, y lo que ve a través del cristal delantero principal. Para la visión lateral, el conductor tendrá que girar en cierto grado su cuello y orientar sus ojos. Los límites de esta zona están marcados por el máximo giro de cuello y tronco que el conductor es capaz de realizar, por los montantes del vehículo, y por la presencia o no de caja trasera en el mismo.

Pero durante la conducción es necesario conocer también lo que ocurre en la zona posterior del vehículo. Para ello, los conductores se valen de sus espejos retrovisores.

El **ángulo muerto es el área que no queda cubierta por los espejos retrovisores**, ni por la visión directa. Hay un ángulo muerto en cada lateral del vehículo. Está comprendido entre el límite de la visión lateral directa, y el límite de la visión por el retrovisor lateral.

En el esquema siguiente (Figura 9-1) se muestran las diferentes zonas de las que se ha hablado. En color amarillo, la visión directa del conductor. En color verde, la visión por los distintos espejos retrovisores. En color morado y rayado, el ángulo muerto.

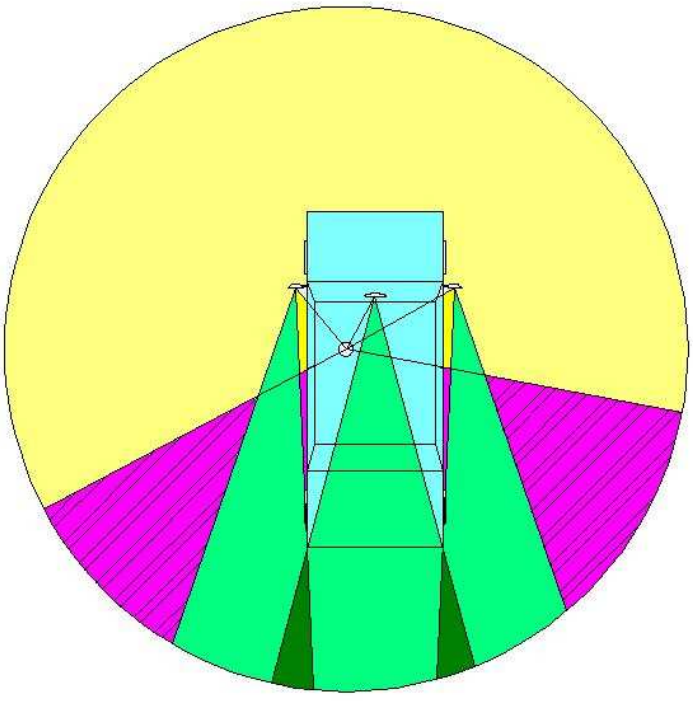


Figura 9-1. Esquema sobre el campo de visión del conductor

En el siguiente dibujo (Figura 9-2), se muestra un ejemplo de cómo el ángulo muerto puede ocasionar situaciones peligrosas. En un cambio de carril hacia la izquierda, el conductor puede no haber detectado la motocicleta que le adelanta por la izquierda. Una motocicleta es un vehículo cuyas dimensiones le permiten permanecer en el ángulo muerto por completo, quedando oculta al conductor.

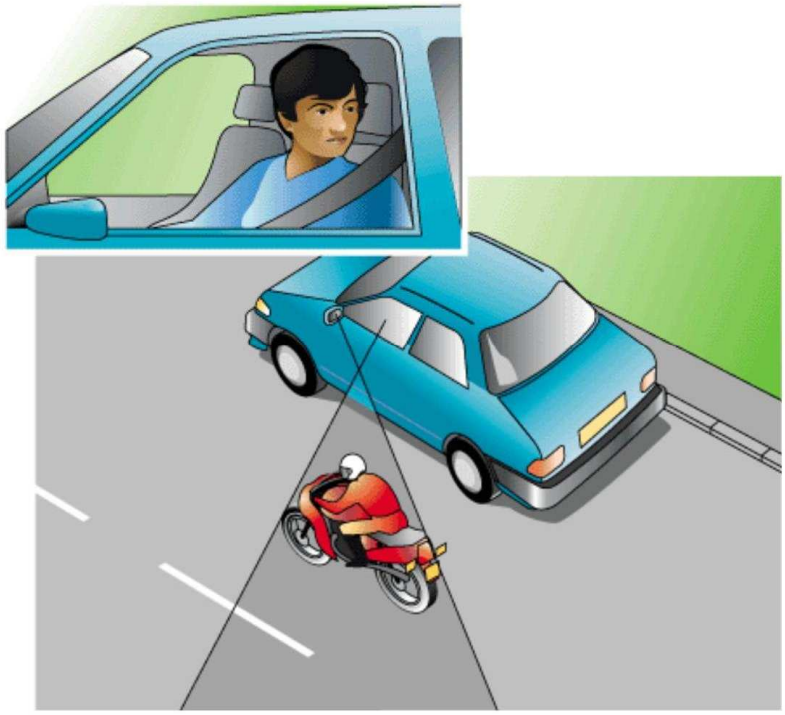


Figura 9-2. Ejemplo de vehículo en el ángulo muerto

A pesar de lo que aquí se ha expuesto, el ángulo muerto es una zona relativamente pequeña, por lo que los posibles vehículos en confrontación no permanecerán en ella demasiado tiempo. Durante un adelantamiento, por ejemplo, el vehículo que es adelantado deja de ver al vehículo que lo adelanta durante una fracción de segundo. Ocurre cuando deja de verlo por el retrovisor, pero aún no lo ve por el lateral. Sin embargo, los conductores suelen saber que están siendo adelantados, y suelen detectar al vehículo que los adelanta antes de que éste desaparezca en el ángulo muerto.

9.1.2 Aplicación a las incorporaciones oblicuas

Como ya se ha comentado en otras ocasiones, en una intersección oblicua, puede darse la circunstancia de que **el carril con preferencia quede en el ángulo muerto**. En esa situación, el conductor se verá obligado a girar la cabeza fuera de su posición normal. El siguiente esquema (Figura 9-3) muestra esta situación, tanto en incorporación a izquierdas como a derechas, para vehículos articulados con remolque.

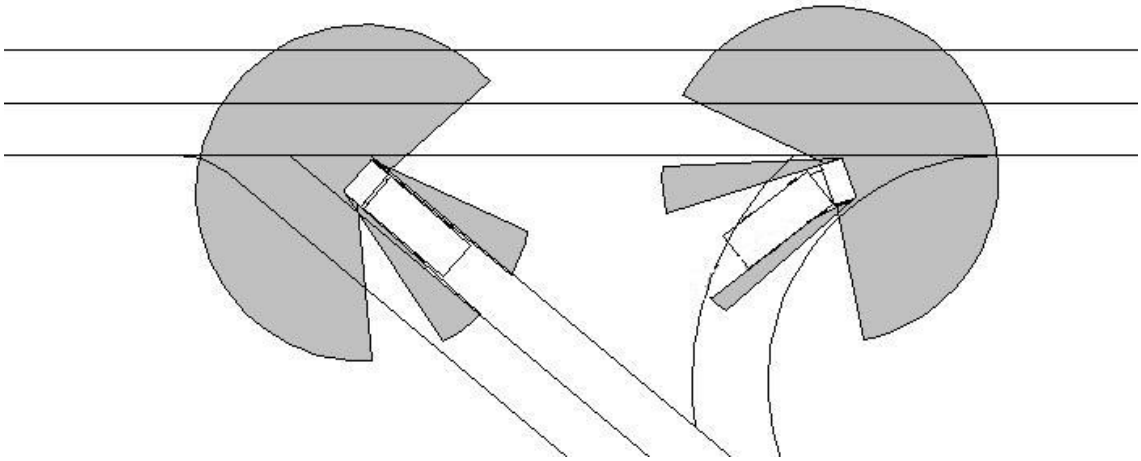


Figura 9-3. Disposiciones oblicuas en las que la vía principal queda en el ángulo muerto

9.2 Espejos retrovisores

9.2.1 Tipos

Los vehículos pueden tener distintos tipos de espejos. En primer lugar tenemos los **espejos laterales**. En épocas anteriores la normativa sólo obligaba a situar un espejo retrovisor en el lado izquierdo. Actualmente, la mayor parte de los vehículos en circulación disponen de un espejo retrovisor en cada lateral. En segundo lugar tenemos el **espejo central interior**. Este espejo se sitúa en el interior del vehículo, en la parte central, y permite al conductor observar la parte posterior de su vehículo.

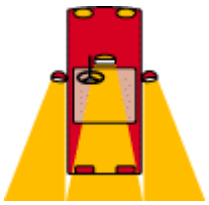


Figura 9-4. Ángulo cubierto por cada uno de los espejos

Dentro de cada tipo, la superficie especular **puede ser plana o convexa**. Las superficies planas tienen la ventaja de que la imagen no se distorsiona, son fáciles de interpretar, el conductor puede calcular distancias fácilmente. Las superficies convexas tienen la ventaja de que permiten un mayor ángulo de visión, aunque la imagen se deforma y se hace más difícil su interpretación.

Figura 9-5. Espejo convexo situado encima de uno plano convencional

9.2.2 Orientación de los espejos retrovisores

Existen **dos estilos de orientación** de los espejos retrovisores laterales. En el primero, el tradicional, el retrovisor es situado de manera que el conductor vea algo de la parte trasera de su vehículo. El segundo, más novedoso, sitúa el retrovisor de manera que el campo visual del mismo tiene su límite en la parte trasera del automóvil. La línea de visión límite se sitúa paralela a la carrocería.

En realidad, la parte trasera del automóvil no es algo que sea necesario observar por el retrovisor. Ese ángulo queda cubierto por el espejo retrovisor central interior. Y, sin embargo, sí que interesa aumentar al máximo el ángulo cubierto por los retrovisores laterales, para reducir el ángulo muerto.

Kline (1997) comenta este segundo estilo de orientación de los espejos, recomendado por la "Automotive Society for Safety Engineers" (ASSE). Para conseguir esta orientación en el retrovisor izquierdo, se debe pegar la cabeza a la ventanilla (de la izquierda), y, desde esa posición, situarlo de la manera tradicional (viendo una porción de la parte posterior del vehículo). Al volver la cabeza la situación habitual, el conductor observará que tiene un campo de visión más amplio hacia la izquierda. Si desea comprobar la parte posterior de su vehículo, tendrá que ladear su cabeza hacia la ventanilla, o bien utilizar el espejo retrovisor central.

Del mismo modo, para orientar el espejo retrovisor central, ladeará su cabeza situándolo en frente de dicho espejo, y lo orientará como está acostumbrado (con la manera tradicional). De esta manera el retrovisor central cubre las zonas que han dejado de cubrir los espejos laterales.

El autor comenta que el cambio de un estilo de retrovisores a otro puede exigir un periodo de adaptación. La duración del mismo puede ser de unos 10 días, pero depende de la pericia del propio conductor.

Mazzae y Garrot (1995) también comentan las ventajas del segundo estilo de orientación. En la Figura 9-6, extraída del artículo, se muestra con línea continua el límite de visión proporcionado por el retrovisor en la posición tradicional. En línea discontinua se muestra este límite, si el retrovisor se reorienta adecuadamente. Como también se muestra el área cubierta por la visión directa, puede apreciarse una clara disminución del ángulo muerto.

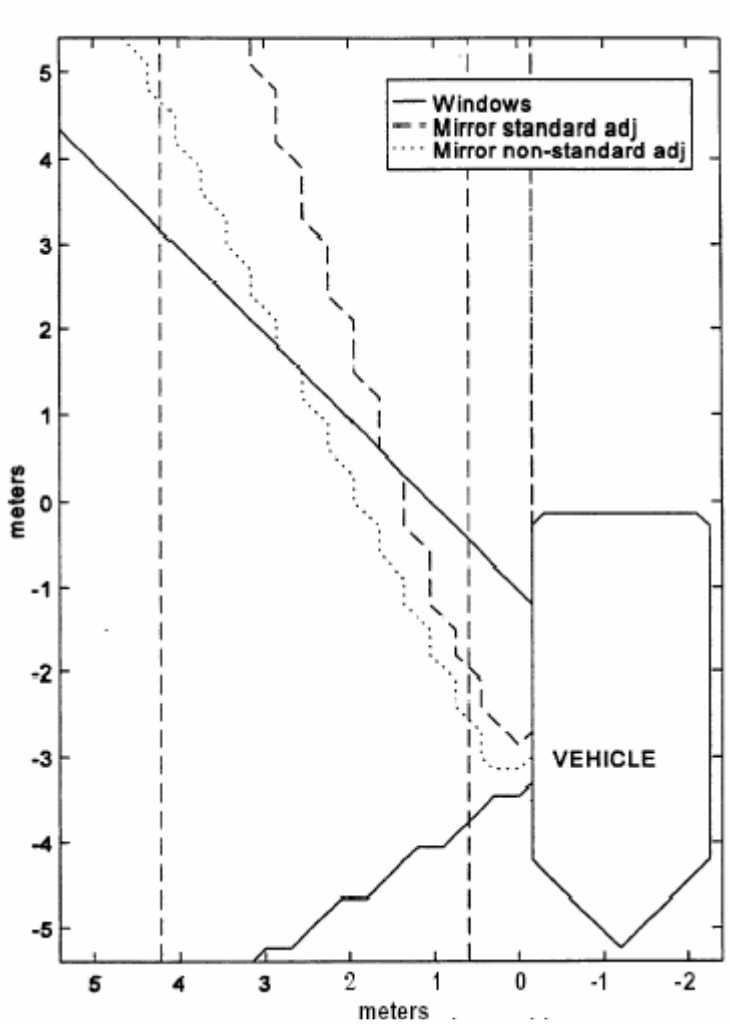


Figura 9-6. Áreas cubiertas por el retrovisor, según dos orientaciones posibles

9.2.3 Estudios comparativos entre tipos de espejos

Además de la adecuada orientación de los espejos retrovisores, otra alternativa para reducir el ángulo muerto es **aumentar el tamaño y cambiar la forma de los retrovisores**. Pueden encontrarse en la literatura específica diversos estudios sobre el campo de visión conseguido con un tipo u otro de espejos. A continuación se comentarán algunos de estos textos.

Mazzae y Garrott (1995) muestran en unos gráficos la ganancia de visión conseguida mediante el uso de espejos convexos acoplados a una ambulancia norteamericana. En el retrovisor derecho se ha situado un espejo convexo circular de 20,3 cm de diámetro. En la Figura 9-7 se puede ver la silueta del vehículo, los carriles delimitados y los campos de visión a la derecha de la ambulancia. En línea continua se representa la visión directa del conductor, en línea discontinua la visión que se obtiene con los retrovisores tradicionales y la delimitación de los carriles, y punteado está reflejado el campo de visión que se obtiene al colocar los espejos convexos.

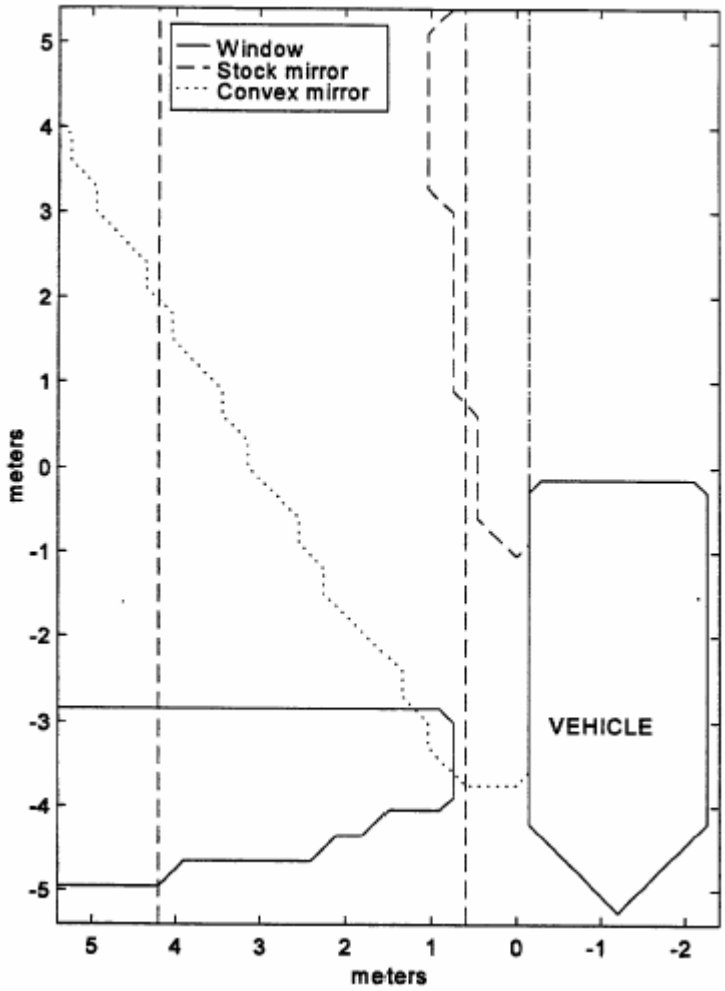


Figura 9-7. Visión ampliada en el costado derecho al colocar un espejo convexo circular

Además, en el izquierdo del vehículo de estudio, situaron un espejo convexo rectangular de dimensiones 17,2 x 12,4 cm. En la Figura 9-8 se muestra el campo de visión obtenido con este espejo auxiliar, comparado con el campo de visión habitual.

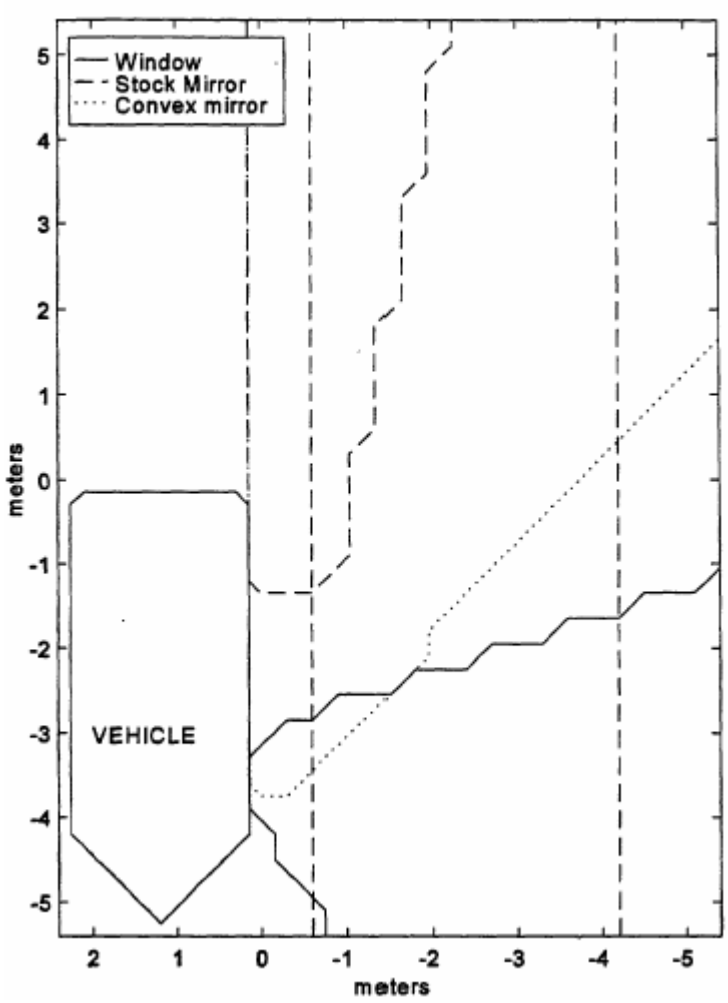


Figura 9-8. Visión ampliada en el costado izquierdo al situar un espejo convexo rectangular

Staplin y otros (1998) realizaron un informe acerca de un estudio realizado sobre 4 alternativas de espejos retrovisores laterales frente a los planos tradicionales. Se escogieron varios conductores y se les realizaron pruebas estáticas de campo visual, así como dinámicas con la ayuda de simuladores que les situaban en la situación de desear realizar un cambio de carril. Se midieron las actuaciones y los tiempos invertidos en realizar el cambio de carril y se fijaron como parámetros el tamaño del campo de visión, la distorsión de la imagen y la edad del conductor.

Se comprobó que sólo un tercio de los conductores confiaron completamente en los nuevos sistemas sin realizar giros de cabeza para asegurarse de la no-peligrosidad de la maniobra. Esto podría interpretarse en primer lugar como que a los conductores en general les cuesta confiar en unos espejos que no suelen emplear. La reducida población que se fiaba completamente, habría que saber si no giraron la cabeza por ello o, simplemente porque su movilidad no se lo permitía, ya que estos autores incluyeron gran cantidad de conductores mayores de 65 años en su estudio

Luoma y otros (1994), por último, revisaron 407 accidentes durante maniobras de cambios de carril entre los años 1987 y 1992 como información para compañías aseguradoras. Se analizaron los accidentes de cambios de carril a izquierdas que involucraban a vehículos que poseían espejos retrovisores laterales izquierdos planos,

convexos o multirradiales. Estos accidentes se compararon con la referencia que eran los accidentes de cambios de carril a la derecha.

Los resultados mostraron que no existía diferencia entre los espejos convexos o multirradiales en cuanto a la frecuencia de accidentes, pero sí que había una reducción del 22 % en accidentes respecto a los vehículos que usaron retrovisores planos. Por tanto, estos autores concluyen que la ganancia de campo visual es más importante que la desventaja de proporcionar una imagen distorsionada. Recomiendan el empleo de espejos convexos y multirradiales porque reducen la siniestralidad.

9.2.4 Modelos comerciales de espejos auxiliares

Existen en el mercado multitud de productos destinados a suplementar el campo de visión del conductor mediante la adición de nuevos espejos. A continuación se mostrarán algunos de los productos comerciales disponibles.

En otro capítulo posterior se presentarán otras alternativas para aumentar y complementar el campo de visión del conductor, no basadas en espejos sino en dispositivos electrónicos como videocámaras y pantallas de circuito cerrado, sensores de infrarrojos o ultrasonidos, y radares.

Retrovisor central panorámico

Hercules JRP Inc. presenta su *20/20 Vision Mirror*, que es un espejo retrovisor central, destinado a sustituir el espejo que incluye el coche en su fabricación. Se trata de un espejo plano, pero de un tamaño mucho mayor, que permite una visión panorámica, cubriendo todos los ángulos muertos.

En las figuras siguientes (Figura 9-9 y Figura 9-10) se muestra una comparación del campo de visión obtenido por un retrovisor convencional, y con este retrovisor panorámico.

Figura 9-9. Campo de visión con retrovisor normal

Figura 9-10. Campo de visión con retrovisor panorámico

En el siguiente diagrama, proporcionada por el fabricante, se muestra el ángulo cubierto por este espejo retrovisor central (Figura 9-11).

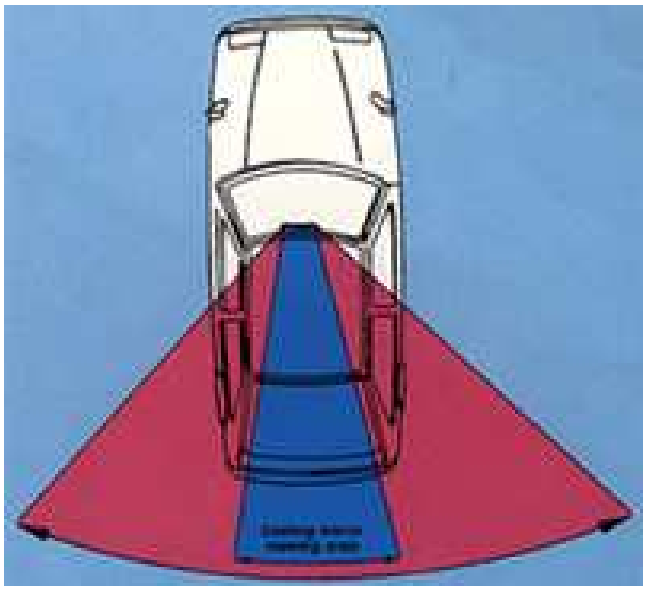


Figura 9-11. Área cubierta por un retrovisor panorámico

Retrovisor central convexo

La corporación "Lanechanger Inc." es una empresa canadiense que se encarga de desarrollar nuevos modelos de espejos convexos para mejorar la visión en los automóviles y, fruto de estos estudios, han sacado al mercado varios productos como el *Lanechanger III*, que es un espejo central panorámico que sustituye a los clásicos. Se trata de una solución similar a la anteriormente mostrada.

Figura 9-12. Área cubierta por un retrovisor convexo

La diferencia fundamental es que este modelo presenta dos zonas diferenciadas. En la parte inferior del espejo tenemos un espejo retrovisor plano convencional, de manera que el conductor puede observar a través de él como lo hace normalmente. En la zona superior tiene un espejo panorámico convexo, que amplia su campo de visión. Al tener ambos espejos situados cerca, el usuario puede contrastar las imágenes. La interpretación de la imagen deformada que proporciona el espejo convexo se hace mucho más fácil.

Esta empresa tiene varios productos disponibles. El *Lanechanger I* es un espejo suplementario, que se coloca sobre el espejo central del propio vehículo, suplementando la información visual de éste. El *Lanechanger III* es un espejo compuesto, formado por dos espejos: uno plano y otro convexo.

Figura 9-13. Visión con un espejo convexo complementario

Figura 9-14. Visión con un espejo compuesto suplementario

Retrovisor central panorámico y convexo

Existen modelos de espejos que aúnan las ventajas de los dos anteriores: son panorámicos (gran superficie) al mismo tiempo que tienen una cierta curvatura. Un ejemplo se muestra en la siguiente fotografía.

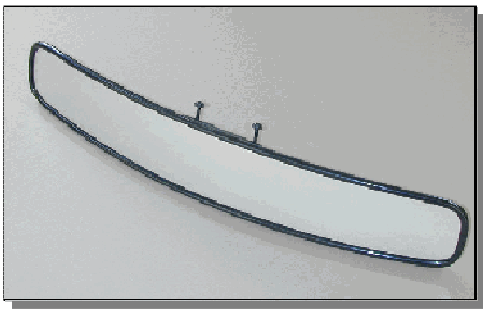


Figura 9-15. Retrovisor central panorámico y convexo

Retrovisor central compuesto

Una manera alternativa de obtener un retrovisor central de mayor campo de visión es yuxtaponer varios espejos planos, al espejo que ya incorpora el vehículo. Esta idea es la utilizada por Stewart Dean, presentada bajo la denominación de *Wink Panoramic Rear View Mirror*. Se trata de un producto de grandes dimensiones, pero que llega a cubrir por completo los alrededores del vehículo.

El inconveniente de este producto es la excesiva yuxtaposición de imágenes. Puede llegarse el caso de que el conductor vea saturada su capacidad de observación y no sea capaz de extraer la información visual deseada, de entre todas las imágenes presentadas.

Figura 9-16. Espejo central compuesto

Retrovisor lateral superpuesto

Interactive Driving Systems, Inc. comercializan diversos accesorios para una mejor conducción. Entre ellos, destacaremos el producto *Smart View Mirrors* que se trata de un espejo retrovisor lateral convexo suplementario. El conductor puede usar el espejo retrovisor lateral de la manera usual. Pero junto a este espejo tiene un pequeño espejo convexo que le muestra el ángulo muerto.

A continuación se muestra una secuencia de adelantamiento vista mediante este espejo (Figura 9-17). Podemos ver que en una primera fase, el vehículo que adelanta se ve tanto en la zona plana como en la convexa. Esa fase de solape permite al conductor interpretar adecuadamente la imagen convexa deformada. En la fase intermedia, el vehículo se encuentra en el ángulo muerto y sólo puede verse bien mediante el espejo convexo. En la última fase, el vehículo ya escapa del ángulo muerto, y comienza a verse por visión directa, a través de la ventanilla.

Figura 9-17. Secuencia de un adelantamiento vista mediante "Smart View Mirror"

Existen múltiples productos similares en el mercado, de diferentes formas y dimensiones.

Figura 9-18. Espejos convexos rectangulares a situar sobre los laterales planos

Retrovisor lateral yuxtapuesto

Este tipo de espejos auxiliares se montan sobre el espejo lateral convencional de nuestro vehículo. De esta manera no disminuye nuestro campo de visión por el espejo tradicional. Por el contrario, son espejos más caros, de mayores dimensiones, con peor estética, y más difícil instalación.

Un ejemplo de este tipo es el comercializado por la empresa Hercules JRP Inc., denominado *Auxiliary mirror*. Disponen de versiones en diferentes tamaños.

Figura 9-19. Espejo lateral convexo yuxtapuesto

Espejo interior adicional

Además de situar espejos junto a los espejos convencionales incluidos en cualquier vehículo, se pueden añadir otros espejos en otras posiciones. La más habitual es en la esquina superior del cristal frontal.

Estos espejos se sujetan en el propio cristal o en la carrocería. Están orientados hacia el ángulo muerto. Pueden ser planos o convexos, pero es más habitual éstos últimos. Su uso está más extendido entre los vehículos pesados y largos.

Figura 9-20. Ejemplo de espejo interior auxiliar rectangular convexo

Figura 9-21. Ejemplo de espejo interior auxiliar circular convexo

9.3 Ángulo cubierto por los retrovisores

9.3.1 Estudio experimental de González y García

Objetivo

Un estudio experimental reciente (González y García, 2002) realizado en Valencia, estudió la amplitud del campo que el conductor puede observar por sus retrovisores.

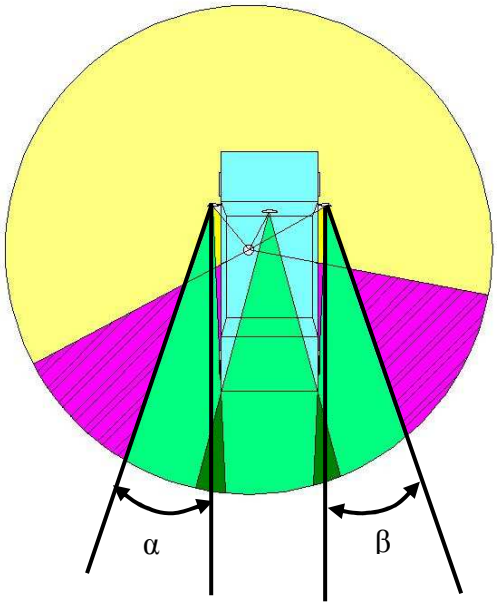


Figura 9-22. Ángulos que se pretenden estudiar

Implementación experimental

Para la toma de datos utilizaron un dispositivo compuesto por un jalón, una base rígida de longitud conocida, y una cinta métrica.

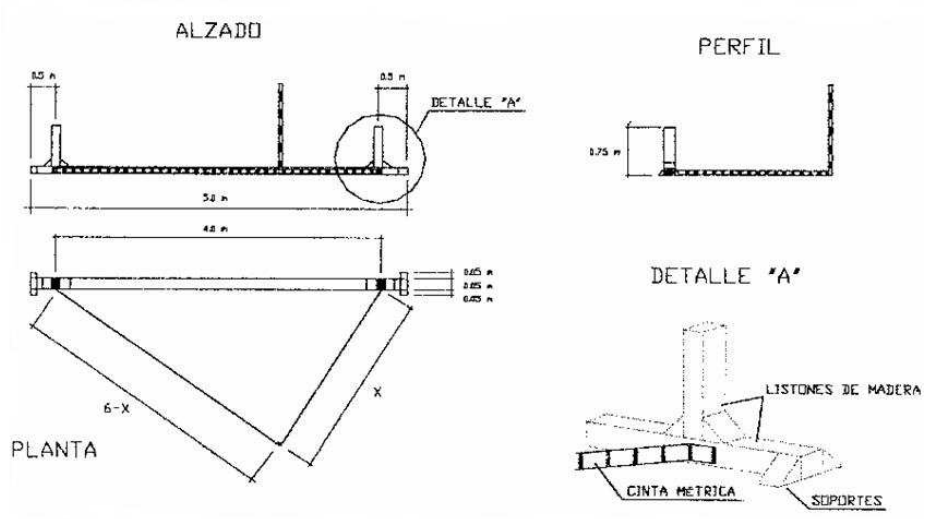


Figura 9-23. Dispositivo de medida utilizado

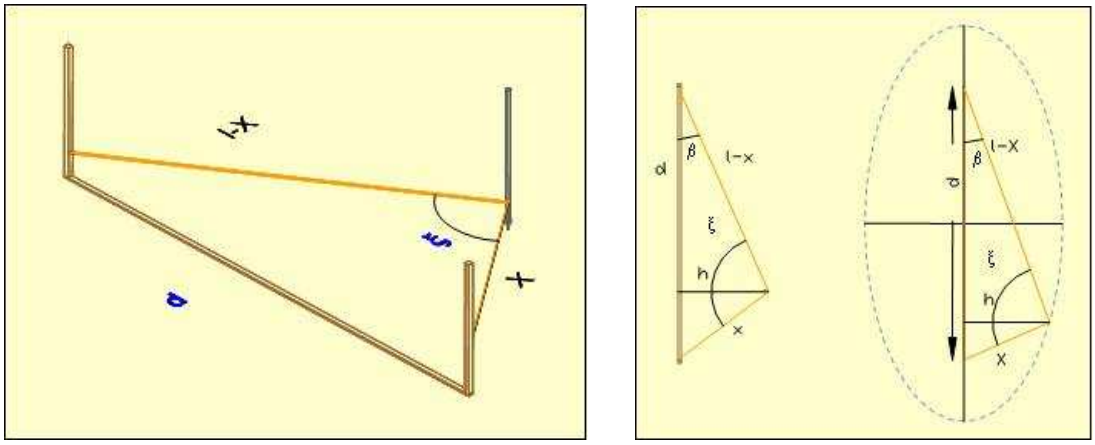


Figura 9-24. Corquis del dispositivo de medida utilizado

Pidieron la colaboración desinteresada de una gran cantidad de conductores anónimos, abordados en el aparcamiento de un centro comercial. El proceso era sencillo. Dos técnicos situaban un jalón en las inmediaciones del vehículo, estando éste parado, y con el conductor situado en su interior, en la posición habitual de conducción. Entonces se le pedía que indicase en qué momento dicho jalón quedaba fuera del alcance visual que tenía por sus espejos. El esquema adoptado para la toma de datos experimental garantizaba un error máximo global de 2º en la medida del ángulo por el retrovisor.

Figura 9-25. Ejemplo de toma de datos del ángulo por el retrovisor izquierdo

Figura 9-26. Ejemplo de toma de datos del ángulo por el retrovisor derecho

Se recogió información sobre la edad del conductor, su estatura, la posición adelantada o no de su asiento, el tipo de espejos que utilizaba (convexos o no), su sexo, y el modelo y marca de su vehículo.

Se pidió al conductor que observase por sus dos retrovisores laterales, y en dos posiciones distintas. Una de ellas con el cuerpo adelantado, y otra con la espalda completamente apoyada contra el respaldo del asiento. Como puede imaginarse, los ángulos de visión obtenidos son muy diferentes al adelantar la cabeza hacia el volante.

Solamente se obtuvieron datos de turismos, en la Comunidad Valenciana, pero se combinaron con los datos de ventas de los distintos modelos. De esta manera, se tomaron medias de los valores de campo, ponderadas con la proporción de cada modelo en el parque nacional de vehículos. Es decir, los modelos más habituales pesaron más en el cálculo de las medias. Como resultado, los valores calculados son aplicables al conjunto del territorio nacional. El total de vehículos con datos recogidos representa el 42% de todos los vehículos en circulación en España.

En las siguientes páginas se resumen algunas de las conclusiones más importantes de este estudio. Recurriremos en ellas al uso de **diagramas "caja-bigote"**. Mientras que los diagramas de barras sólo son capaces de mostrar un valor por cada barra, en un diagrama caja-bigote se representan las características fundamentales de cada distribución estadística.

En ellos, se muestra de manera resumida, la distribución de una variable cuantitativa. El centro de la caja es la mediana, y una cruz en su interior, la media. Los bordes de la caja son los cuartiles 25% y 75%. De ella salen unos "bigotes", que son líneas que se extienden hasta los valores máximo y mínimo de los considerados "normales". Los valores anómalos se dibujan como puntos aislados, lejanos de la media. El criterio que define un valor anómalo es que se encuentre, respecto a la media, más allá de 2.5 veces la desviación típica. Para una distribución normal teóricamente perfecta, se detectarían un 5% de valores anómalos.

También se utilizará la herramienta estadística ANOVA o "Análisis de la varianza". Esta técnica investiga la posibilidad de que exista relación entre 2 factores recogidos en una muestra experimental. Para cada una de las relaciones posibles, diremos que sí es estadísticamente significativa si su "p-valor" correspondiente es menor a 0.05. Esto significa que la probabilidad de que ambas variables sean independientes es menor al 5%. Para más información sobre esta técnica, puede consultarse cualquier texto de estadística, por ejemplo, Romero y Zúñica (1993).

Ángulo de visión por los retrovisores

En la Figura 9-27 se muestra un diagrama "caja-bigote" de las distribuciones globales obtenidas para cada una de las configuraciones posibles: retrovisor izquierdo o derecho, y en posición adelantada o retrasada. Puede observarse cómo el campo de visión por el retrovisor lateral izquierdo es muy superior al obtenido por el derecho. Y cómo el campo también aumenta bastante al adelantar la cabeza. El ángulo se mide en grados sexagesimales.

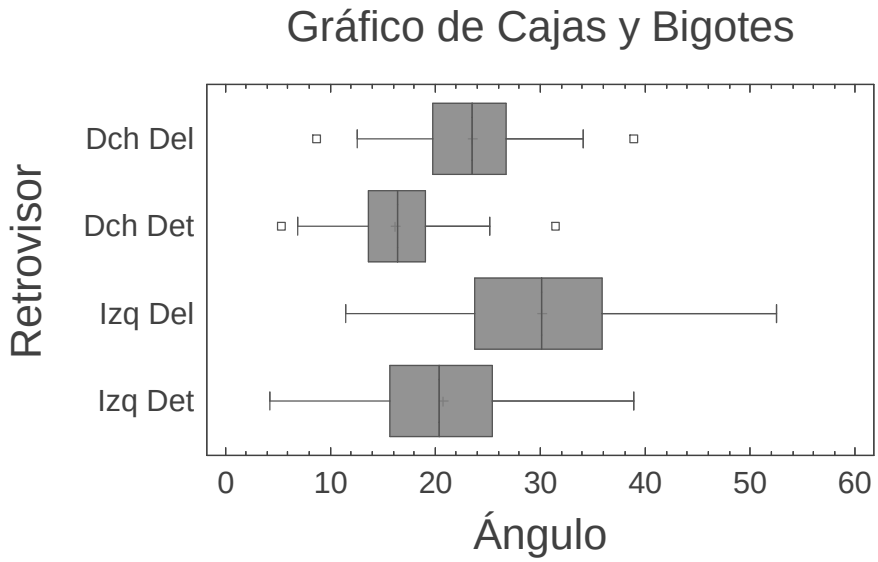


Figura 9-27. Ángulos de visión obtenidos por cada uno de los retrovisores, en diferentes posiciones

Los valores numéricos correspondientes al anterior gráfico se muestran en la Tabla 9-1, convenientemente ponderados en función de las ventas de cada modelo.

	Posición adelantada		Posición retrasada		Posición intermedia	
	Izq.	Der.	Izq.	Der.	Izq.	Der.
Media	30.89	23.37	21.88	16.11	26.29	19.62
Desv. típica	7.97	4.92	6.60	3.60	6.90	3.94

Tabla 9-1. Ángulos de visión obtenidos por cada uno de los retrovisores, en diferentes posiciones

Ángulo de visión y tipo de vehículo

Los distintos modelos de vehículo se clasificaron según categorías. En el gráfico siguiente (Figura 9-28) se muestran los resultados del ángulo por el espejo retrovisor izquierdo, en posición retrasada, en función de la categoría del vehículo.

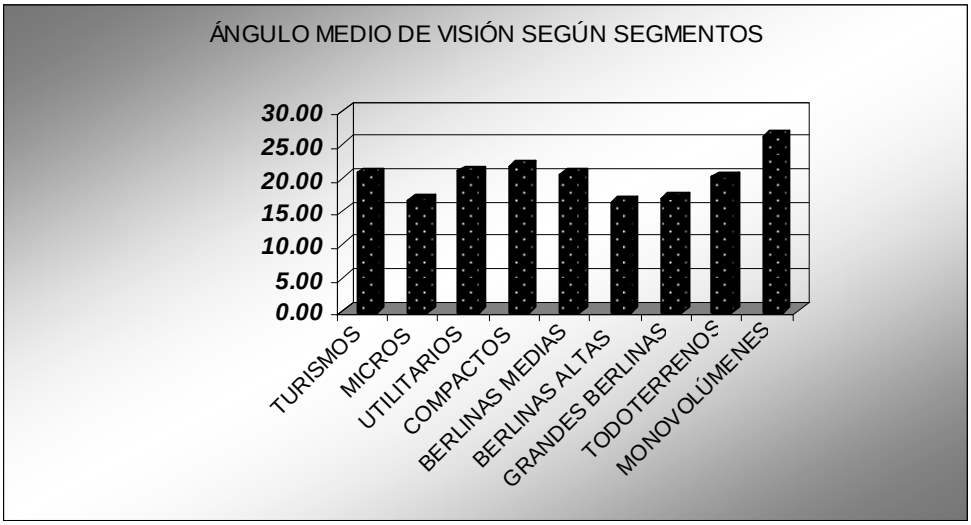


Figura 9-28. Ángulo por el espejo retrovisor izquierdo, en posición retrasada, en función del tipo de vehículo.

No obstante, hemos de reseñar aquí que los datos recogidos son muy escasos en algunas de estas categorías. Para las categorías en las que hay una muestra suficientemente grande (utilitarios, berlinas medias, compactos), no se encontraron diferencias significativas. Por tanto, un análisis ANOVA (Análisis de la Varianza) sobre los datos nos indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre unas categorías y otras.

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coeficiente-F	P-Valor
Entre grupos	458.079	7	65.4398	1.34	0.2335
Intra grupos	7846.82	161	48.738		
Total	8304.9	168			

Tabla 9-2. Análisis ANOVA del ángulo de visión respecto al tipo de vehículo

Son necesarios más datos de las categorías más infrecuentes para poder afirmarlo. Las diferencias son pequeñas, y la variabilidad elevada, por lo que se requieren muchos datos. En el siguiente gráfico (Figura 9-29) podemos observar cómo hay muy pocos datos recogidos de algunas de las categorías.

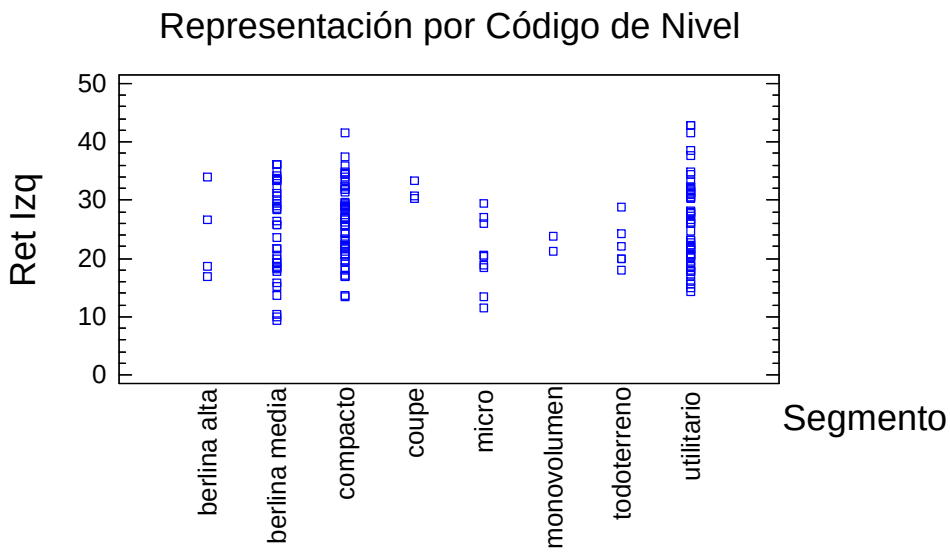


Figura 9-29. Datos obtenidos, en función del tipo de vehículo

Ángulo de visión y sexo del conductor

En cuanto al sexo del conductor, se obtuvo que **no existe diferencia** estadísticamente significativa entre un sexo y el otro. El P-Valor del test F del procedimiento ANOVA es 0.5172, muy alto.

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coeficiente-F	P-Valor
Entre grupos	19.0862	1	19.0862	0.42	0.5172
Intra grupos	7794.62	162	45.3175		
Total	7813.17	173			

Tabla 9-3. Análisis ANOVA del ángulo de visión respecto al sexo

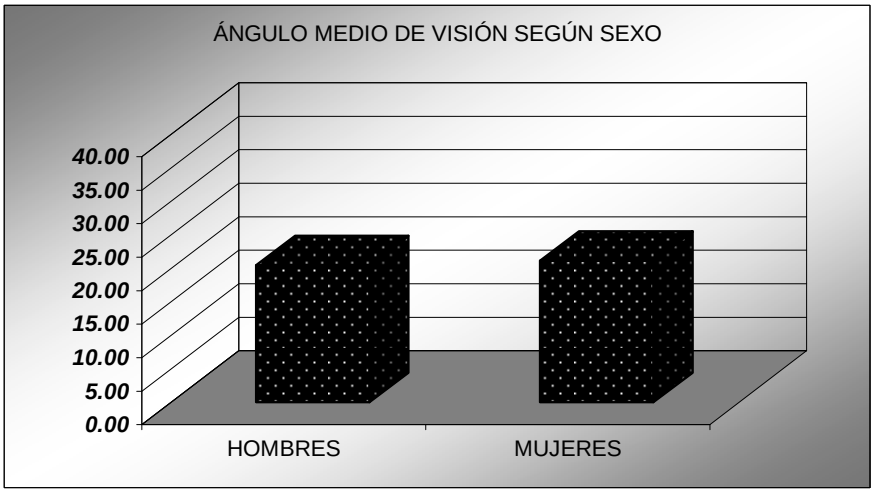


Figura 9-30. Ángulo cubierto por el retrovisor izquierdo, en posición retrasada, según el sexo

En el gráfico de cajas y bigotes puede compararse la pequeña diferencia observada en la media, respecto a la gran variabilidad de las poblaciones (Figura 9-31). Esa pequeña diferencia no es estadísticamente significativa.

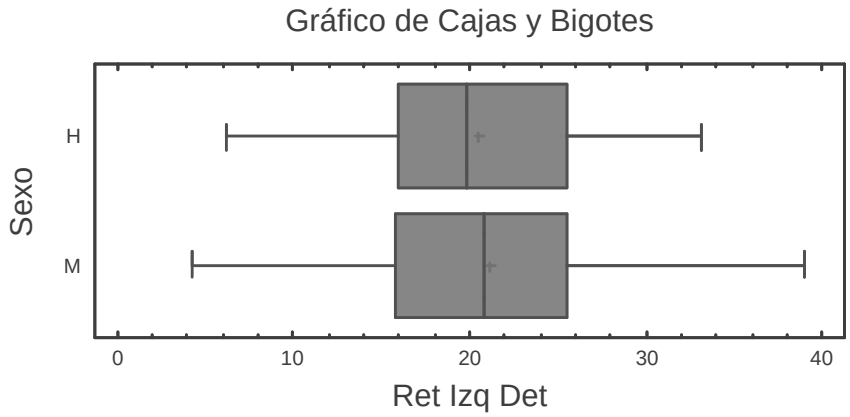


Figura 9-31. Ángulo cubierto por el retrovisor izquierdo, en posición retrasada, según el sexo

Ángulo de visión y edad

El estudio del efecto de la edad sobre el ángulo por los retrovisores sí detecta una relación estadísticamente significativa, aunque muy débil. La edad de los conductores se codificó en 7 tramos correlativos: 18-20, 21-24, 25-34, 35-44, 45-54, 55-64, y más de 64 años. Hay pequeñas diferencias entre cohortes de edad. Parece ser que tanto los jóvenes como los ancianos aprovechan peor sus retrovisores. Los jóvenes, quizá por falta de experiencia. Las personas mayores, quizá por falta de movilidad.

A continuación se muestran los resultados (Figura 9-32).

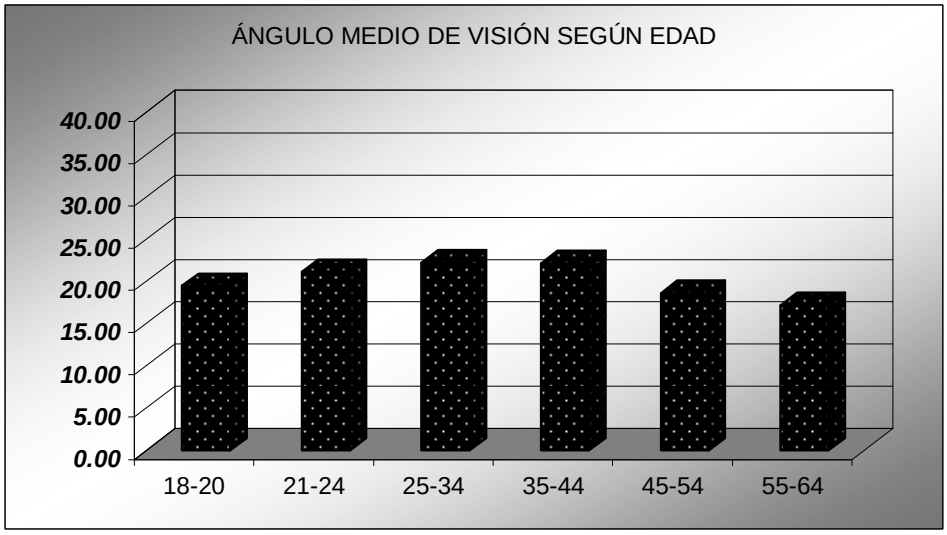


Figura 9-32. Ángulo por el retrovisor izquierdo, en posición retrasada, por edades

Se ha intentado encontrar una relación polinómica de 2º grado entre el ángulo y la edad. Ambos factores, el lineal y el parabólico, resultaron estadísticamente significativos según el análisis ANOVA.

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coeficiente-F	P-Valor
Modelo	693.609	2	346.805	7.49	0.0008
Residuo	7548.79	163	46.3116		
Total	8242.4	165			

Tabla 9-4. Análisis ANOVA del modelo de regresión entre ángulo de visión y edad del conductor

Modelo de ajuste: $Ret\ Izq = 19.9479 + 4.5526 \cdot Edad - 0.734411 \cdot Edad^2$

R^2 ajustada: 8.41% (muy bajo)

Parámetros del modelo

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P-Valor
Constante	19.9479	4.01693	4.96595	0.0000
Edad	4.5526	2.2937	1.98483	0.0488
Edad^2	-0.734411	0.293435	-2.50281	0.0133

Tabla 9-5. Parámetros del modelo de regresión entre ángulo de visión y edad del conductor

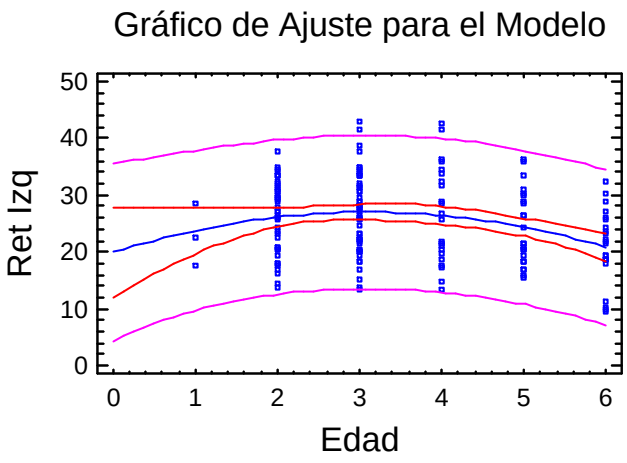


Figura 9-33. Modelo de regresión de 2º grado, entre el ángulo por retrovisor y la edad

Ángulo de visión y posición del asiento

Hemos visto que el conductor, al adelantar su cuerpo hacia el volante, obtiene un mayor campo de visión. De la misma manera, si el asiento del vehículo lo tiene situado algo adelantado, entonces también obtiene mayor ángulo por sus retrovisores. Se recogió, cualitativamente, la distancia entre el volante y el respaldo del asiento, según tres niveles posibles: próximo, normal y alejado.

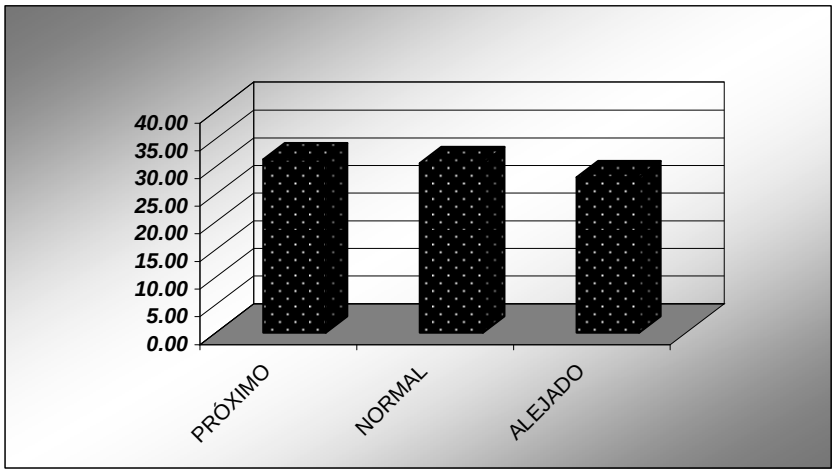


Figura 9-34. Ángulo a través del espejo retrovisor izquierdo, en función de la posición del asiento

Las diferencias son pequeñas, como vemos en la Figura 9-34. En un primer momento, no son estadísticamente significativas, al considerar los tres niveles de la variable "asiento".

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coeficiente-F	P-Valor
Modelo	210.283	2	105.142	1.63	0.1993
Residuo	10716.4	166	64.5568		
Total	10926.7	168			

Tabla 9-6. Análisis ANOVA entre el ángulo de visión y la postura del conductor

Pero si repetimos el análisis, esta vez agrupando "próximo" y "normal" en un único nivel, el resultado es distinto. Definimos una variable que vale "1" para "asiento alejado", y "0" en el resto de casos. Esa variable sí es significativa (al 90%). Por tanto, queda demostrada que existe una relación. Al tener el asiento más alejado, el ángulo cubierto por el retrovisor es menor.

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coeficiente-F	P-Valor
Modelo	195.706	1	195.706	3.05	0.0828
Residuo	10731.0	167	64.2575		
Total	10926.7	168			

Tabla 9-7. Análisis ANOVA entre el ángulo de visión y postura atrasada

Ángulo de visión y convexidad del espejo

La última variable analizada es la convexidad de los espejos. Resulta obvio que los espejos convexos permiten un campo de visión mayor que los planos. Sin embargo, los espejos convexos deforman la imagen y dificultan la apreciación de las distancias por parte del conductor.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación (Figura 9-35).

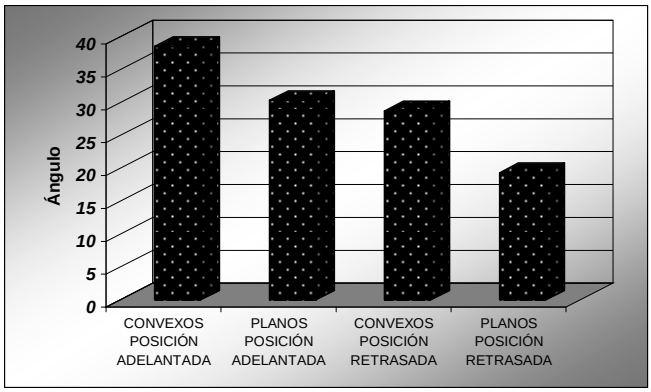


Figura 9-35. Ángulo de visión por el retrovisor, en función de la convexidad del mismo

El gráfico de "cajas y bigotes" siguiente nos muestra cómo el ángulo por el retrovisor izquierdo es de media 30,24º si éste es convexo. Si, por el contrario, es un espejo plano, el ángulo cubierto es de media 22,38º.

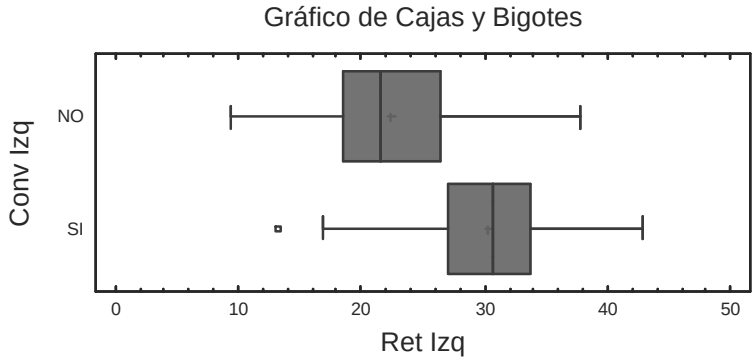


Figura 9-36. Ángulo por el retrovisor izquierdo, en función de la convexidad del mismo

El estudio ANOVA realizado sobre este factor demuestra que es estadísticamente significativo, al 99%.

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Coeficiente-F	P-Valor
Modelo	2486.87	1	2486.87	71.38	0.0000
Residuo	5818.03	167	34.8385		
Total	8304.9	168			

Tabla 9-8. Análisis ANOVA entre ángulo de visión y convexidad del espejo

Ángulo de visión según el modelo del vehículo

Por último, mostraremos los resultados de los datos recogidos, clasificados por modelos de vehículo. Sólo se muestran los que tienen mayor proporción en el parque automovilístico nacional. La media aparece reflejada con una cruz roja, mientras que las líneas azules muestran los intervalos de confianza para el cálculo de la misma. La longitud de la línea azul es una medida de la incertidumbre en el cálculo de la media, debido al insuficiente número de datos.

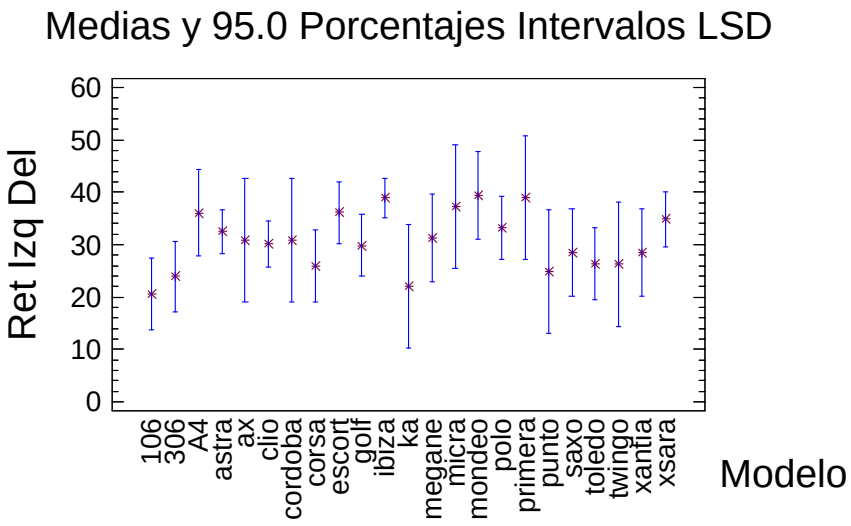


Figura 9-37. Valores medios obtenidos en la medida del ángulo por el retrovisor izquierdo, en posición adelantada, según el modelo del vehículo

Se puede observar que existen diferencias notables entre unos modelos y otros, aunque, dado el reducido número de datos, esas diferencias no se pueden concretar. Haría falta una población mayor, con varias decenas de individuos por cada modelo a estudiar.

Valores de cálculo

Para terminar, resumiremos este apartado anotando los valores característicos que vamos a necesitar en los modelos.

De cara a plantear un modelo de cálculo, hemos de tomar un valor del campo de visión, a través de los retrovisores, que quede del lado de la seguridad. Para ello, adoptaremos una situación lo suficientemente desfavorable, pero que se dé con cierta frecuencia. Este modelo es el que se utiliza para realizar un diseño seguro.

Descartaremos la posición adelantada pues resulta incómodo mantener esa postura durante mucho tiempo, y muchos conductores indicaron que nunca adoptaban esa posición. La posición retrasada puede utilizarse como postura cómoda y válida para todos los casos. En maniobras realizadas a baja velocidad, como por ejemplo las de incorporación, puede adoptarse el valor correspondiente a la posición intermedia. Una gran parte de los conductores adelanta su tronco ligeramente para ganar visibilidad en circunstancias de visibilidad difícil. Para quedar del lado de la seguridad, adoptaremos los **percentiles 10%** de los datos obtenidos, convenientemente ponderados en función de las ventas de cada modelo. Estos **valores característicos de diseño**, expresados en grados sexagesimales, son (Tabla 9-9):

	Posición retrasada		Posición intermedia	
	Izq.	Der.	Izq.	Der.
Valor de cálculo	13.4	11.5	17.5	14.6

Tabla 9-9. Valores para el diseño, del ángulo de visión por los retrovisores

Si se desean utilizar otros percentiles, a continuación se incluye el gráfico de distribución acumulada ponderada, correspondiente al retrovisor izquierdo en posición intermedia. La curva "ponderado" se refiere a los datos recopilados en el estudio, mientras que la curva "regresión normal" corresponde a la distribución ideal correspondiente a los parámetros extraídos (media y desviación típica).

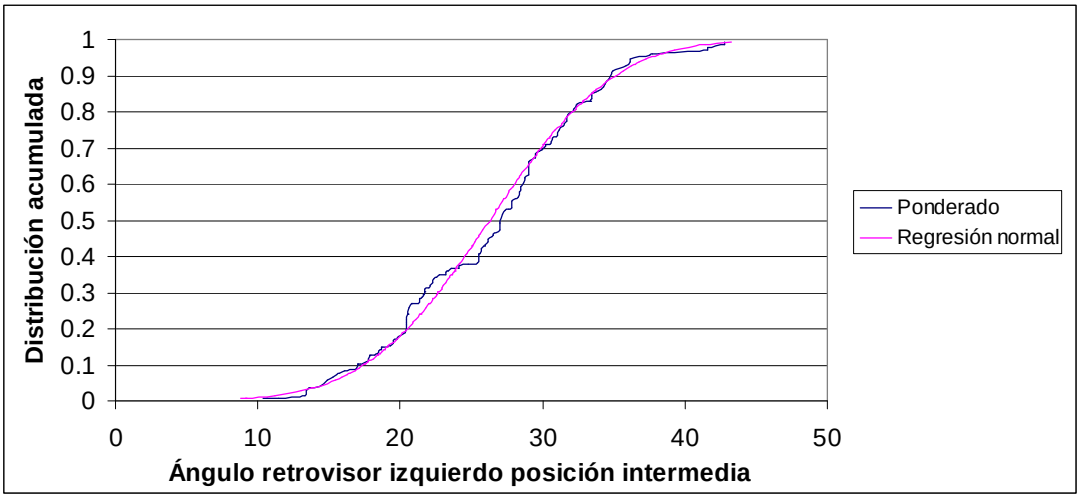


Figura 9-38. Distribución acumulada ponderada para el retrovisor izquierdo

De la misma manera, se incluye el gráfico para el espejo retrovisor derecho.

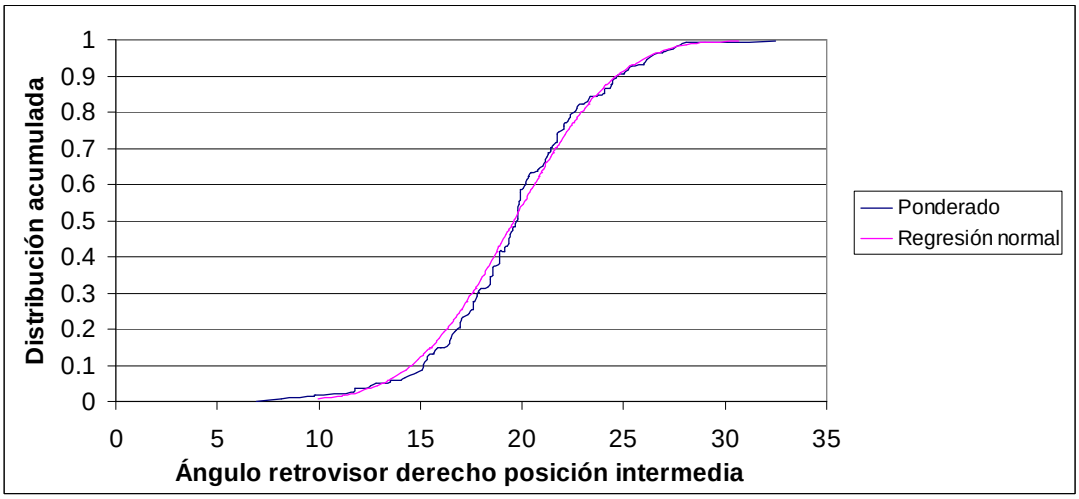


Figura 9-39. Distribución acumulada ponderada para el retrovisor derecho

En el lado opuesto, para plantear un modelo explicativo de la realidad, hemos de tomar un **valor característico medio**. Ese valor central, medio, es el más probable. Para tomar un valor intermedio, para cada individuo se toma el valor medio del obtenido con posición adelantada y retrasada. Los valores medios ponderados según las ventas de cada modelo, sin distinguir entre sexos, convexidad, o posición en el asiento son los siguientes (Tabla 9-10):

	Posición intermedia	
	Izq.	Der.
Valor medio	26.29	19.62

Tabla 9-10. Valores del ángulo de visión por los retrovisores para el modelo explicativo

9.3.2 Estudio experimental de Gattis y Low

Objetivo

Otro estudio experimental interesante sobre la visibilidad obtenida por el conductor dentro del vehículo es el llevado a cabo por Gattis y Low (1997). Este estudio no analiza la amplitud del campo de visión por los retrovisores. Lo que trata de determinar es la amplitud del campo visual del conductor hacia su derecha, cuando la parte trasera de su vehículo le dificulta la visión.

Como comenta el artículo, la línea de visión del conductor a la derecha puede verse obstaculizada por elementos propios del vehículo, tales como la carrocería, el habitáculo, o un remolque. Esta investigación trata de obtener cuál es el ángulo de visión en esta dirección para varios vehículos que pueden sufrir el problema citado, para aplicar estos conocimientos en el diseño de cruces oblicuos.

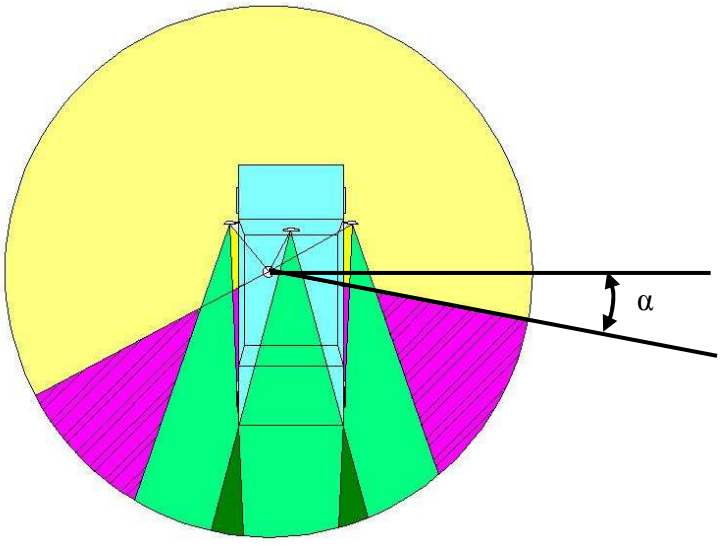


Figura 9-40. Ángulo que pretenden determinar Gattis y Low en su estudio

Diseño experimental

Los vehículos elegidos para el estudio, por ser más propensos a sufrir los problemas de visibilidad en la dirección lateral, fueron vehículos "con caja". En concreto, una ambulancia, un camión de la basura, una vivienda transportable, un autobús escolar, un autobús con chasis de caravana, una cabeza tractora portando un contenedor y una cabeza tractora sin trailer. Sin embargo, para intentar que los resultados fueran más homogéneos, se eliminaron los resultados obtenidos con el camión de la basura, el autobús con chasis de caravana y el autobús escolar, por presentar una visibilidad mucho menor que el resto de vehículos.

Dado que la posición del conductor es de vital importancia para los resultados a obtener en cuanto a visibilidad, se manejaron varias posibilidades para quedarse con dos situaciones opuestas. Se analizó el ángulo de visión en una posición llamada *sit-back position* en la cual el conductor mantiene la espalda pegada al respaldo de su asiento, y en otra posición llamada *lean-forward position* donde los ojos del conductor se sitúan sobre el volante del automóvil. Estas dos posiciones son las utilizadas en el estudio experimental de González y García (2002).

En la primera posición el conductor solo dispone de sus movimientos de cuello y cabeza para obtener su campo de visión, mientras que, en la segunda, el hecho de adelantar el cuerpo permite al sujeto ampliar su ángulo de visión. En esta última posición, los conductores tenían los brazos totalmente flexionados, lo cual puede dificultar la acción de girar el volante, e incluso es posible que algunos conductores con problemas físicos no puedan situarse de este modo. Se eligieron estas dos posiciones por representar los dos extremos entre las infinitas posiciones del cuerpo del conductor, aliviando de subjetividad al estudio y acotando el problema. Posteriormente, para realizar algunos cálculos, adoptan el valor medio de ambos extremos, como representativos de la situación.

Para obtener datos de los ángulos de visión, se necesitó un amplio espacio y el alquiler de los automóviles citados anteriormente, antes de comenzar con el proceso de medición propiamente dicho. Una vez conseguido lo anterior, se situaba a los vehículos inmóviles con el conductor en su posición retrasada (*sit-back position*) y se trazaba una línea en el suelo paralela al vehículo que marcara el lateral derecho de éste (*right edge parallel line*), como se ve en la Figura 9-41.

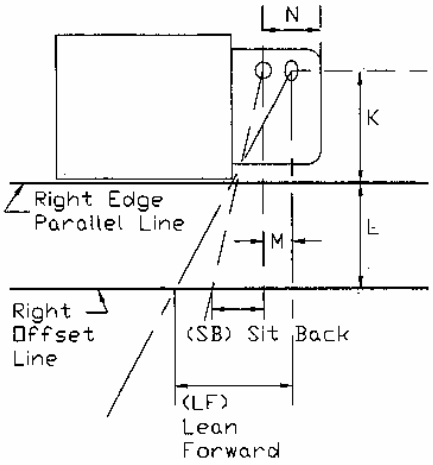


Figura 9-41. Esquema diseñado para la investigación de Gattis y Low

Para obtener esta línea, se midieron los anchos de los ejes tanto traseros como delanteros y su diferencia se dividía por dos. Después se sumaba esta distancia al ancho del parachoques delantero hacia la derecha y allí se trazaba, perpendicular a los ejes del vehículo, la citada línea. A continuación, se medía la distancia en horizontal y paralelamente al vehículo entre las dos posiciones de los ojos del conductor (*M*), así como la distancia entre los ojos en la posición retrasada (*sit-back position*) y el parachoques del automóvil (*N*). La distancia horizontal paralela a los ejes del vehículo entre los ojos del conductor y la línea paralela lateral (*right edge parallel line*) se medía trazando previamente líneas perpendiculares con la ayuda de unos moldes de cartón (*K*). Ayudándose de otros moldes se trazaba otra línea paralela a la línea paralela lateral a una distancia conocida *L*, llamada línea lateral retranqueada (*right offset line*). En estas líneas se marcaban los puntos que se encontraban alineados con los ojos del conductor en las dos posibles posiciones. Se puede ver una imagen de este esquema en la Figura 9-42.

Figura 9-42. Trazado de líneas auxiliares en el suelo para el experimento

Tras realizar estas líneas en el suelo, se comprobaban las perpendiculares con elementos de topografía, obteniendo que las geometrías trazadas fueran lo suficientemente exactas, quedando preparada la superficie y el vehículo para la medición del ángulo de visión lateral.

Para obtener los ángulos de visión, se usaba un jalón con un nivel que se desplazaba hacia atrás sobre la línea lateral retranqueada hasta que el conductor del vehículo lo perdía de vista. En ese momento se hacía una marca en el suelo y se medía la distancia *SB* o *LF* entre estos puntos y los marcados paralelos a la situación de los ojos del conductor. Este procedimiento se repetía 3 veces y se sacaba la media. Se puede ver el momento en que un ayudante marca estos puntos en el suelo en la Figura 9-43.

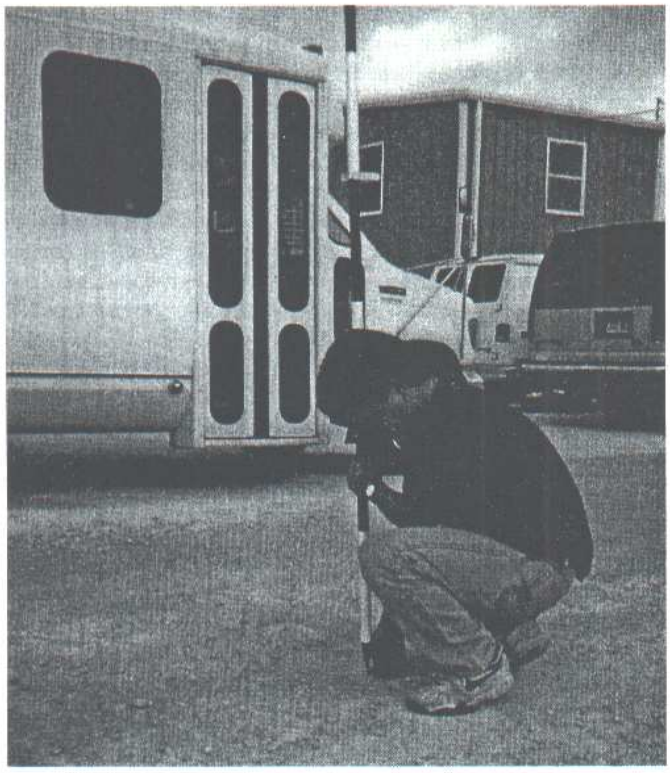


Figura 9-43. Posición del jalón para el experimento

Resultados obtenidos

Una vez se han medido estas distancias mediante leyes trigonométricas, se obtienen los ángulos de visión en las dos posiciones del conductor empleando las fórmulas que se muestran seguidamente:

$$VA_{SB} = arctg \frac{SB}{L+K}$$

$$VA_{LF} = arctg \frac{LF}{L+K}$$

VA_{SB} es el ángulo de visión en la posición retrasada (*sit-back position*) y VA_{LF} es el ángulo de visión en la posición adelantada (*lean-forward position*).

Los ángulos de visión medios obtenidos fueron 4,5º para la posición retrasada y 22,5º para la posición adelantada, pero para el análisis se usó la primera posición y una media entre las dos por considerarlo más realista que suponer un conductor con la cabeza sobre el volante durante un tiempo prolongado. Así, se tomaron los valores siguientes:

	Ángulo
VA_{SB}	4,5º
VA_{LF}	13,5º

Tabla 9-11. Valores de diseño para el ángulo de visión lateral a la derecha

9.3.3 Estudio experimental de Son y otros

Otro estudio en la línea del presentado por Gattis y Low (1997), tiene por título "Methodology to calculate sight distance available to drivers at skewed intersections" (Son y otros, 2002).

Problema de visibilidad estudiado

Estos autores centran su estudio en intersecciones reguladas por "stop", en las que el vehículo que trata de realizar la maniobra se detiene completamente. Esto es una ventaja, puesto que pueden realizar un cálculo pseudo-estático.

Analizan el triángulo de visibilidad en disposiciones oblicuas, identificando cómo la oblicuidad afecta a la distancia de visibilidad.

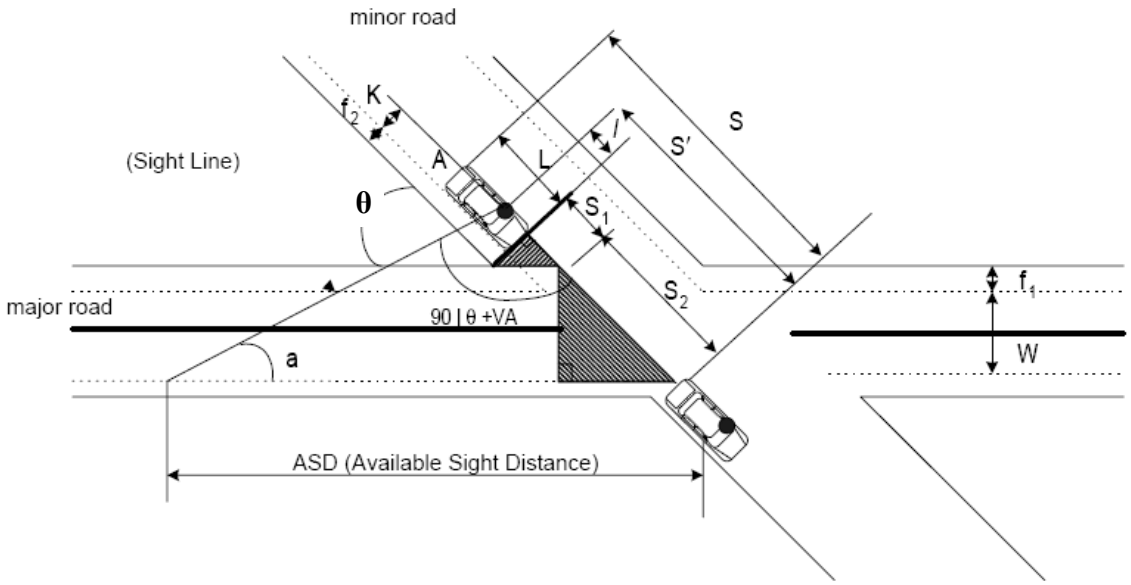


Figura 9-44. Triángulo de visibilidad en disposiciones oblicuas

El ángulo *VA* (*visual angle*) tiene el mismo significado que para Gattis y Low (1997), se trata del ángulo que el conductor es capaz de ver por el lateral derecho de su vehículo. El ángulo θ es la oblicuidad de la intersección. El significado y valor del resto de variables geométricas puede consultarse en el texto original.

En este momento nos interesa indicar cómo los autores relacionan la distancia de visibilidad disponible (*available sight distance*) con la magnitud de ese ángulo *VA* y la oblicuidad θ.

Los autores realizan un estudio experimental similar al de Gattis y Low (1997), midiendo la magnitud del ángulo *VA* con 15 conductores, en diferentes vehículos, con diferentes posturas. Se incluyen vehículos de tipo turismo, camiones rígidos y camiones articulados. Las 3 posturas de conducción estudiadas son: atrasada (*sit-back position*), adelantada (*lean-forward position*) e intermedia (*confort position*).

Resultados experimentales

Los resultados de estas mediciones se incluyen a continuación (Figura 9-45, Figura 9-46 y Figura 9-47).

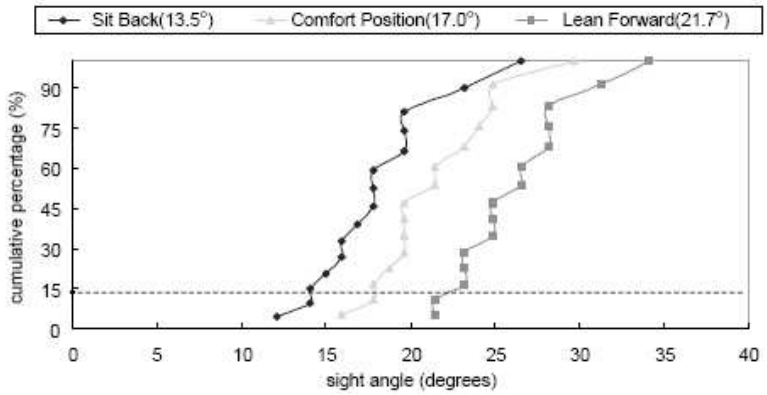


Figura 9-45. Valores de VA medidos en turismos

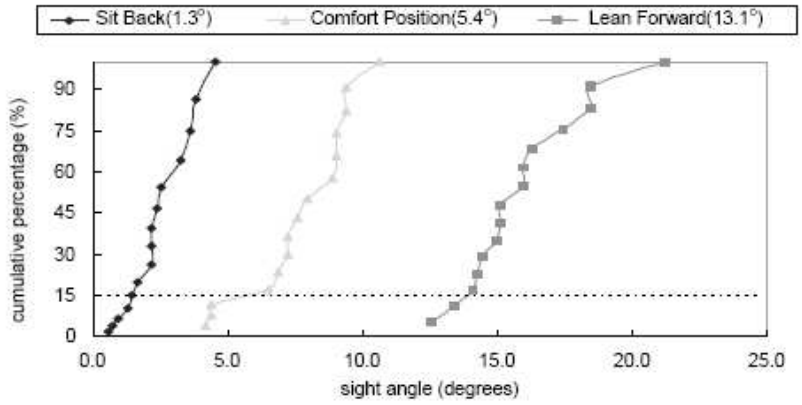


Figura 9-46. Valores de VA medidos en camiones rígidos

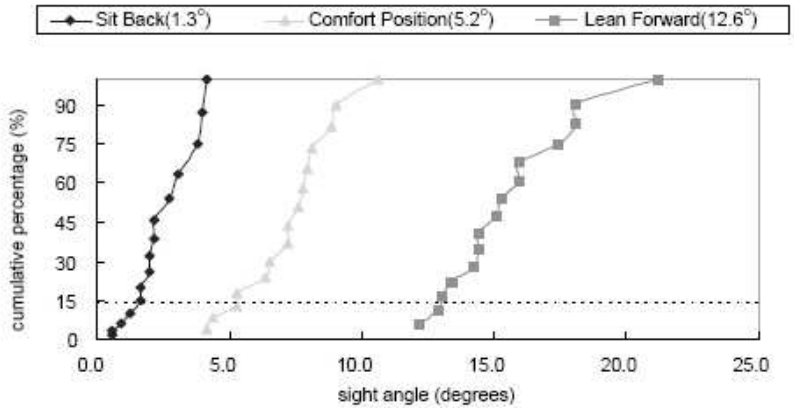


Figura 9-47. Valores de VA medidos en camiones articulados

Analizando estos datos, podemos ver que:

- El turismo es el vehículo tipo con mejor visibilidad.
- La posición adelantada (*lean-forward*) proporciona mejor visibilidad que las otras dos.
- No hay muchos datos disponibles, pero hay una cierta dispersión.

Conclusiones para el diseño

Con el fin de tomar datos del lado de la seguridad, los autores proponen adoptar el percentil 15% de los resultados experimentales. Estos valores de cálculo se muestran en la siguiente tabla.

Design Vehicle	Visual Angle (degrees)		
	VA_{SB}	VA_{CP}	VA_{LF}
Passenger Car	13.5	17.0	21.7
Large Vehicle	1.3	5.4	13.1
Semi-Trailer	1.3	5.2	12.6

Tabla 9-12. Valores de diseño del campo visual hacia la derecha

Tras realizar una serie de cálculos los autores demuestran que, excepto para turismos, en cualquier intersección con ángulo de oblicuidad menor de 70º, la visibilidad disponible es inferior a la necesaria, incluso para velocidades extremadamente bajas (20 km/h). Esto quiere decir que **ángulos de oblicuidad menores a 70º son peligrosos** para todo tipo de vehículos "con caja" (camiones).

Por otro lado, la visibilidad disponible aumenta considerablemente al reducir la oblicuidad por encima de 70º, haciéndose (teóricamente) infinita al llegar a 90º. En la Figura 9-48 puede verse este cambio de tendencia en la visibilidad disponible (*available sight distance*), especialmente para la posición adelantada (VA_{LF}), a partir de 70º.

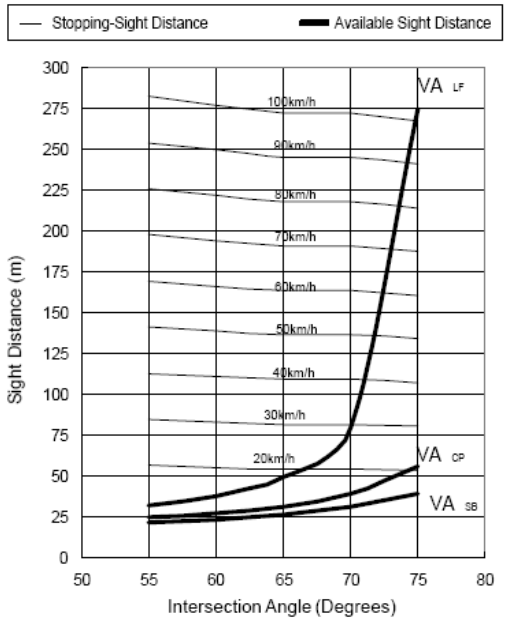


Figura 9-48. Comparación entre visibilidad disponible y necesaria, para camiones rígidos

9.3.4 Normativa australiana de diseño de carreteras

En pocos textos normativos o recomendaciones se identifican los límites visuales del conductor en su vehículo. Pero el texto "Guide to Traffic Engineering Practice - Part 5: Intersections at Grade" (Austroads, 2005) es una excepción.

La Figura 9-49 muestra los ángulos de visión que este texto acepta como válidos. Nótese que en Australia el conductor se sitúa en el sillón derecho del vehículo, al contrario que en España. Se adopta el mismo ángulo por cada uno de los retrovisores laterales, e igual a 25º. En cuanto al ángulo de visión hacia el lado opuesto del conductor, considera como límite 20º, mientras que hacia el mismo lado del conductor admite 30º. Realizan una mención explícita al ángulo muerto en vehículos "con caja" (zona sombreada).

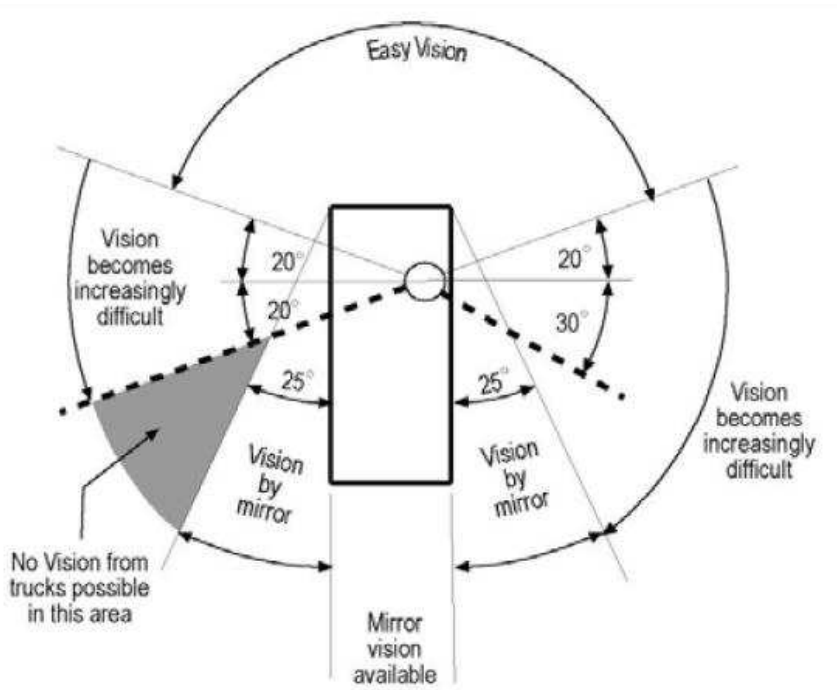


Figura 9-49. Campo de visión del conductor en su vehículo

Comparando estos valores con los señalados en otros textos comentados anteriormente, vemos que se trata de ángulos medios, pero no valores del lado de la seguridad. Es demasiado optimista pensar que la mayor parte de los conductores tiene un campo visual de 25º por sus retrovisores.

9.4 Conclusión

En este capítulo se ha profundizado sobre cuál es el campo visual de que dispone el conductor.

En un primer apartado se han definido varias zonas en ese campo visual: la visión frontal, la visión lateral, y la visión por los espejos retrovisores. El área que queda fuera del campo visual se denomina "ángulo muerto".

Los retrovisores juegan un papel fundamental a la hora de definir el campo de visión del conductor. Se ha realizado un estudio exhaustivo de los diferentes tipos de retrovisores que podemos encontrar. Existen modelos auxiliares, que el conductor puede instalar en su vehículo, con el fin de aumentar su capacidad visual, y reducir el ángulo muerto.

Se han citado diferentes estudios experimentales que tratan de determinar con precisión el área cubierta por la visión del conductor. El valor concreto en cada caso depende de la postura del conductor, de la convexidad de los espejos, y del tipo de vehículo. Con vistas al diseño de intersecciones, hemos de adoptar unos valores de cálculo, que serán aquellos que estén del lado de la seguridad. Es decir, que sean sobrepasados por la gran mayoría de los conductores.

En la figura se muestra un resumen de los valores de cálculo recogidos en las referencias comentadas.

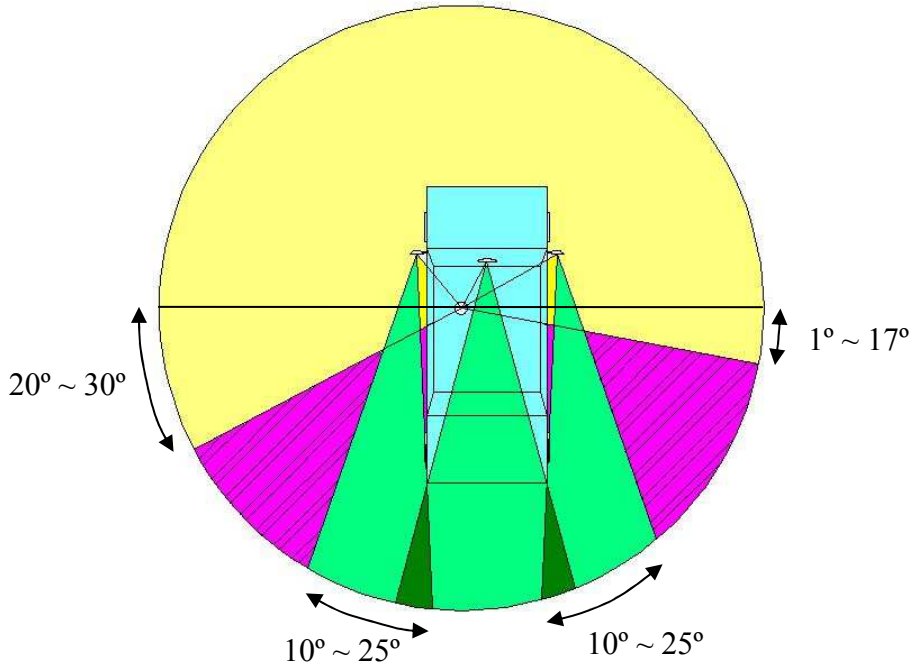


Figura 9-50. Diagrama resumen de los datos recopilados

10 Dispositivos de ayuda a la conducción

10.1 Introducción

Además de los espejos retrovisores, en los últimos años se están desarrollando dispositivos de diverso tipo para ayudar al conductor en su tarea. Estos dispositivos están orientados a proporcionar una información útil al conductor, de manera que la conducción sea mucho más fácil y segura.

Como se indica en "Preliminary Human Factors Guidelines for Crash Avoidance Warning Devices" (U.S. Department of Transportation, 1996), una **alerta de peligro de accidente** (*crash avoidance warning*) es una transmisión de información hacia el conductor, situado dentro de un vehículo, relativa a una probable colisión del mismo. Es una señal de alarma que advierte de un peligro, que se emite puntualmente, para alertar del mismo al conductor y atraer su atención.

Estas alertas de peligro de accidente cumplen diversas funciones. La principal es que alertan al conductor sobre una situación peligrosa, sugiriéndole que debe tomar medidas para evitar la colisión. Idealmente, estas alertas permiten acelerar la respuesta del conductor, pues proporcionan la información adecuada para que tome la decisión correcta de una manera rápida.

Por otro lado, estas señales pueden servir de entrenamiento para el conductor, educándole sobre prácticas indeseables y decisiones inseguras.

Un **dispositivo de ayuda a la conducción** es un aparato electrónico-mecánico diseñado para emitir estas alertas de peligro de accidente. Un sistema de ayuda a la conducción (*crash avoidance system*, *CAS*) consiste en la integración de varios dispositivos individuales.

Este tema tiene cierto **interés en el estudio de incorporaciones oblicuas** ya que existen dispositivos de ayuda a la conducción que están orientados a facilitar este tipo de maniobras. Pueden convertirse en un complemento a la visión del conductor en zonas donde ésta no llega, como el ángulo muerto.

10.2 Objetivos a alcanzar

Podemos instalar dispositivos que traten de obtener todo tipo de información sobre el entorno cercano y más lejano del vehículo. Pero el conductor no necesita esa cantidad de información. Al conductor hay que presentarle cierta información útil, que para él sea difícil de conseguir, en el momento que la necesite.

Hay circunstancias específicas en las que los conductores, en general, tienen dificultades. En dichas situaciones es cuando los dispositivos de ayuda a la conducción son más necesarios.

En una publicación del US Department of Transportation (1999), se indican las principales áreas en las que estos dispositivos pueden ayudar.

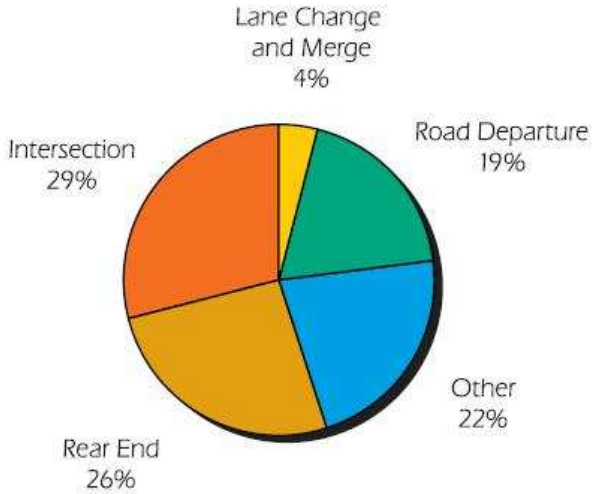


Figura 10-1. Principales campos de aplicación de los CAS

La iniciativa de Federal Highway Administration (EEUU) en torno al vehículo inteligente (IVI Program), publicó "Intelligent Vehicle Initiative, Request for Information" en el registro federal (US DOT, 1997). En este texto se definen 26 funciones que debería tener un sistema de ayuda a la conducción completo.

A continuación se anotan estos servicios que se prestarían al usuario.

- Evitar la colisión por alcance. El sistema analizaría la presencia de vehículos y otros objetos en la trayectoria, y proporcionaría avisos y limitaría la velocidad para evitar que se produjera un alcance o colisión estos objetos.

Según el US DOT (1999) se podrían evitar un 49% de los accidentes por alcance.

Figura 10-2. CAS evitando un accidente por alcance

- Evitar salidas de vía. El sistema analiza la trayectoria del vehículo respecto a la línea de borde de calzada. También analiza la velocidad del vehículo, relacionándola con las alineaciones de trazado por las que circula. En caso de que la velocidad sea excesiva, o la trayectoria inadecuada, se daría una señal de aviso, y/o se corregiría la trayectoria y velocidad del vehículo.

Según el US DOT (1999) se podrían evitar 1.2 millones de accidentes de este tipo, sólo en EEUU.

Figura 10-3. CAS evitando un accidente por salida de carretera

- Evitar colisiones en cambios de carril e incorporaciones. Estos sistemas monitorizarían la posición y velocidad relativa de los diferentes vehículos involucrados. Avisarían al conductor en el momento de iniciar la maniobra, sobre el riesgo de hacerla debido a la cercanía de otros vehículos.

Según el US DOT (1999) se podrían evitar más del 50% de los accidentes en estas situaciones.

Figura 10-4. CAS evitando accidentes en cambios de carril e incorporaciones

- Evitar colisiones en intersecciones. El sistema detecta la posición del vehículo (vía GPS, por ejemplo) y lo sitúa en un mapa de carreteras actualizado. Si hay una intersección en las inmediaciones, entonces el sistema detectaría vehículos en las otras vías, con su posición y su velocidad. Llegado este punto, es capaz de alertar al conductor, si la maniobra de incorporación o cruce no es segura.

En intersecciones reguladas por semáforos, sería posible la implantación de sistemas que permitan la comunicación bidireccional del vehículo con el semáforo. Se reduciría el número de conductores que incumplen las indicaciones semafóricas. Así mismo, podrían ayudar a los vehículos de emergencia, tales como ambulancias, policía, o bomberos.

Figura 10-5. CAS evitando accidentes en intersecciones

- Evitar colisiones en pasos a nivel (intersecciones con ferrocarril). El sistema detecta la cercanía de un paso a nivel, gracias al GPS y a los mapas. Así mismo, el sistema dispone de información relativa a la posición y velocidad del tren más cercano. Entonces es capaz de informar al conductor sobre el momento más apropiado para realizar el cruce.

- Mejora de la visión. El sistema podría recopilar información en el rango de las ondas electromagnéticas infrarrojas. Estas señales infrarrojas las producen fuentes de calor, tales como peatones y otros vehículos, con lo que el sistema conocería la posición de éstos, incluso en condiciones de mala visibilidad. También la infraestructura podría dotarse de emisores infrarrojos en determinados elementos. Estos elementos funcionarían como balizas que guiarían la conducción del vehículo en condiciones de mala visibilidad.

El sistema podría enviar una alerta al conductor, sobre un obstáculo o riesgo en la calzada, incluso cuando éste no sea capaz de verlo por sus propios ojos.

Figura 10-6. CAS complementando la visión del conductor

- Alertas específicas. El sistema podría recibir información sobre peligros específicos y puntuales de la vía, y alertar sobre éstos. Por ejemplo, la infraestructura de la vía podría emitir por radio la situación de puntos de la carretera con pavimento deteriorado, con presencia de hielo, con retenciones, etc. Esta información la recogería el sistema y la presentaría el conductor en el momento oportuno.

- Sistemas de protección inteligente de los ocupantes. El sistema podría reajustar algunos elementos de seguridad pasiva del vehículo, unos instantes antes de que ocurra un accidente, obteniendo la máxima seguridad para los ocupantes. Por ejemplo, podría activar el *airbag* unas centésimas antes de que se produzca la colisión, de manera que éste podría inflarse completamente de una manera más gradual, no tan brusca.

- Ayuda a la orientación. El sistema dispondría de información actualizada sobre mapas de carreteras, para facilitar la orientación del usuario. Del mismo modo, podría sugerir rutas alternativas en función de la situación de las carreteras en un instante determinado.

- Información en tiempo real del estado de la vía. Está relacionado con los dos anteriores. El sistema podría obtener información específica de la vía por la que circula, actualizada al instante concreto, y mostrar esa información al conductor. Dicha información podría incluir el nivel de servicio de la vía, por ejemplo.

- Evitar distracciones al conductor. El sistema podría bloquear posibles fuentes de desconcentración al conductor, en el momento en que éste tenga que realizar una maniobra compleja. Estas fuentes de distracción son teléfonos móviles, radios, reproductores de CD, etc. Pero desbloquearlos cuando la situación en la carretera sea aburrida y sea conveniente evitar la somnolencia.

- Garantizar la estabilidad del vehículo. El sistema analizaría las velocidades de giro de las cuatro ruedas del vehículo. De esta manera es capaz de detectar si se está perdiendo el control del mismo al circular por una curva a demasiada velocidad. En ese caso, el sistema puede emitir una señal de alarma, o actuar automáticamente reduciendo la velocidad del motor y reajustando la velocidad de las ruedas independientemente.

Figura 10-7. CAS enviando un mensaje de alerta por pérdida de estabilidad

- Alerta de somnolencia. El sistema analiza el comportamiento del conductor para detectar si se está produciendo una pérdida de concentración, debida, por ejemplo, a la fatiga. Para conseguirlo, recoge información sobre la frecuencia de parpadeo, los movimientos en los ojos, la respiración del conductor, los cambios de postura.

Figura 10-8. CAS evitando un accidente por somnolencia

- Diagnóstico del estado mecánico del vehículo. El sistema integra la comprobación de diversos indicadores sobre el estado del motor, tales como niveles de aceite, temperatura, agua, etc. En caso de que alguno falle, la señal de alarma se emite por este sistema global.

- Estado de la carga. En vehículos de transporte de mercancías, el sistema puede comprobar diversos indicadores sobre el estado del vagón de carga, tales como temperatura o presión. El transportista sería avisado en caso de que se den condiciones inadecuadas para el tipo de mercancía transportada.

- Transacciones automáticas. El sistema puede facilitar la identificación y el pago de peajes por el uso de determinadas infraestructuras, o tasas por atravesar una frontera.

- Registro de sucesos. El sistema puede registrar en un lugar seguro un registro sobre el estado global del vehículo. Este registro permitiría reconstruir un eventual accidente, identificando las causas de una manera fácil, de manera análoga a las "cajas negras" usadas en aviación. Por otro lado, este registro puede estar convenientemente precintado para ser usado únicamente por las fuerzas del orden. De esta manera, también puede almacenarse información sobre las infracciones cometidas.

- Detección de obstáculos y peatones. El sistema detectaría la presencia de cualquier tipo de obstáculo, animado o inanimado, en las inmediaciones del vehículo, alertando de él al conductor. Especialmente útil en maniobras de aparcamiento.

- Incremento en la precisión de las maniobras. Los autobuses y vehículos de transporte de mercancías pueden realizar las maniobras de acercamiento a la plataforma de carga de una manera más segura, rápida y precisa, quizá totalmente automatizada.

- Vigilancia del estado de los pasajeros. El conductor puede saber en todo momento el estado de sus clientes. También puede ser alertado en caso de que alguno de ellos realice actividades que pongan en peligro al resto del pasaje.

- Información en tiempo real para pasajeros. Los usuarios de medios de transporte público pueden conocer en todo momento la situación de las carreteras y el tiempo estimado de llegada a destino.

- Conducción totalmente automática en determinados lugares. Está relacionado con el incremento de precisión en las maniobras. En determinados lugares convenientemente balizados, sería posible la conducción automática, sin conductor. Por ejemplo, en terminales de carga de mercancías.

- Detección de pérdida de fricción. El sistema detectaría si el coeficiente de rozamiento entre la rueda y el pavimento se reduce (por ejemplo debido a hielo, agua, o mal estado del pavimento), alertando de ello al conductor. Incluso, en versiones más avanzadas, podría ayudar al conductor en las técnicas para recuperar la fricción.

- Control longitudinal. El sistema analiza la posición y velocidad de otros vehículos en la vía, y reajusta la velocidad del propio vehículo para garantizar una distancia mínima de seguridad.

- Control transversal. El sistema analiza la posición transversal del vehículo en la vía, y reajusta dicha posición para que el vehículo circule por el centro de su carril.

Young, Eberhard y Moffa (1995) indican una serie de funciones que sería deseable que este tipo de dispositivos tuvieran. Este texto está orientado a las maniobras de cambio de carril e incorporación, por lo que estas funciones se refieren a facilitar este tipo de maniobras.

Para el cambio de carril, indican las siguientes funciones:

- Alertar de la presencia de vehículos en los carriles adyacentes, justo antes de que el conductor inicie la maniobra. Un conductor normal comprobará que el carril que pretende invadir en su maniobra esté despejado, antes de iniciar la maniobra. Pero es posible que debido a algún problema de visibilidad o de atención, el conductor no haya comprobado la situación del carril adyacente convenientemente. En ese caso, el dispositivo alertaría al conductor sobre el riesgo que corre.
- Alertar al conductor de que circula descentrado en el carril. Cuando un vehículo se mueve transversalmente por su propio carril puede tratarse de un movimiento intencionado y consciente, por parte del conductor. Pero también a una falta de atención o somnolencia. El sistema alertaría al conductor sobre su situación, para que la corrija y evite invadir los carriles adyacentes.
- Alertar de la presencia de vehículos muy lentos o muy rápidos en los carriles adyacentes, antes de que el conductor inicie la maniobra. Además de informar sobre la presencia de un vehículo en las inmediaciones, estos dispositivos deberían ser capaces de alertar también sobre vehículos más alejados, pero con una gran velocidad de aproximación relativa.
- Alertar de la presencia de otros vehículos que también están iniciando la maniobra de cambio de carril hacia el mismo carril que el sujeto. Esto ocurre en carreteras de más de 2 carriles por sentido, si dos vehículos diferentes se proponen invadir el carril central al mismo tiempo, viniendo cada uno de carriles diferentes.

Para el caso de las incorporaciones, indican que estos sistemas deberían alertar en las siguientes situaciones:

- Alertar al conductor cuando se dirija a una incorporación en la que no tiene preferencia. Esto permite aumentar el grado de atención del conductor, que se prepara para realizar la maniobra adecuadamente.
- Informar al conductor sobre la magnitud de los huecos presentes en la vía a la que pretende incorporarse. La valoración de estos huecos suele ser subjetiva e inexacta. Estos dispositivos ayudarían a corregirlo, haciendo que los conductores sepan en todo momento la velocidad relativa de los demás vehículos, así como las distancias a las que se encuentran.

10.3 Esquema de funcionamiento

Simplificadamente, estos dispositivos **constan de varias partes**:

- un conjunto de sensores,
- un sistema de procesamiento de la información, y
- una interfaz que muestra la información al usuario y recibe cierta retroalimentación en la comunicación

El funcionamiento de estos sistemas queda reflejado en el siguiente esquema, extraído de Eberhard y otros (1995). Los **sensores** son la parte de recogida de información, que extraen información del entorno del vehículo, dentro del rango de detección de estos sistemas.

Esta información es tratada por **el elemento central de proceso:** la divide, la ordena, descarta la información no útil y selecciona la que sí es útil. Opera con ella para obtener variables indicativas del sistema. Estas variables sirven de indicadores, y son sometidas a unas pruebas lógicas de comprobación según unos criterios preestablecidos. Si el criterio se cumple, entonces la situación es crítica y es necesario transmitir esta información al conductor.

La interfaz de usuario del sistema se encarga de transmitir la información procesada hacia el conductor, de una manera que éste la entienda, sin distraerle demasiado.

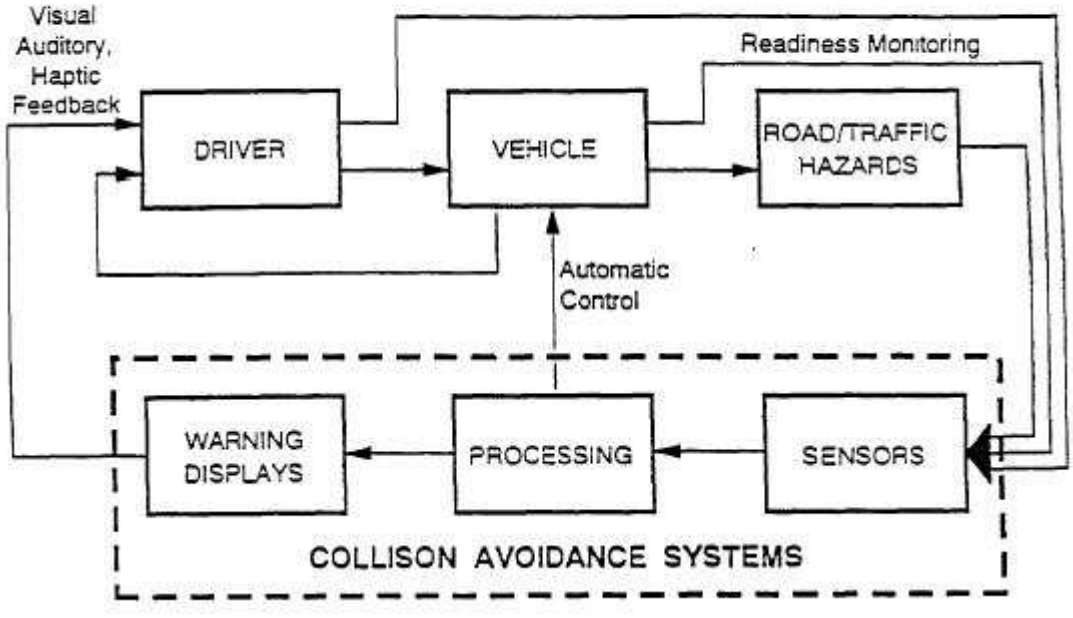


Figura 10-9. Esquema de funcionamiento de un dispositivo de ayuda a la conducción (CAS)

Este sistema queda inmerso dentro del sistema más global formado por el conductor, su vehículo y la carretera (entorno).

Así pues, con la información obtenida gracias al dispositivo de ayuda a la conducción (*collision avoidance system*), y la información que el propio conductor es capaz de obtener, éste tomará una decisión.

El conductor actúa sobre su vehículo para obtener la maniobra deseada y llegar a su destino. El propio vehículo da información al conductor sobre el funcionamiento del mismo, la temperatura del motor, la velocidad, etc.

Los sensores del CAS también pueden obtener información del conductor, analizando su nivel de concentración y alerta, pero también intuyendo las intenciones del propio conductor. Por ejemplo, es posible determinar si un conductor desea realizar un adelantamiento, antes de que éste se produzca, y sin que el conductor transmita su intención de una manera expresa al dispositivo. Para ello el dispositivo analiza la trayectoria seguida por el conductor, su velocidad, la velocidad relativa con el resto de vehículos, el centrado del vehículo en la carretera, la evolución en los últimos segundos, etc.

De la misma manera, **los sensores del CAS monitorizan el estado del vehículo** en todo momento. Como vemos, el dispositivo de ayuda a la conducción no sólo observa el entorno de conducción, la carretera, y los demás usuarios de la vía, también observa al propio vehículo en el que está instalado, y al conductor que lo gobierna.

Durante el procesado de la información, algunos sistemas de ayuda podrían tomar sus propias decisiones automáticamente, sin informar de ello al conductor. Si la situación es muy grave y hay mucho riesgo para el conductor, **el sistema puede decidir automáticamente** reducir la velocidad del vehículo. Esto permite reducir los tiempos de reacción, pues el tiempo de informar al conductor, que éste interprete la información suministrada, y tome una decisión, se hace innecesario. En cualquier caso, el sistema puede informar al conductor de la situación así como de la decisión tomada automáticamente al respecto.

Por último, puede existir un flujo de información desde el conductor hacia el *display* o interfaz. Es una **retroalimentación del sistema**. El conductor puede actuar sobre el sistema, ajustándolo a sus gustos y necesidades. Puede ajustar los umbrales de alarma (niveles a partir de los cuales el sistema avisa de la peligrosidad de la situación). También podría configurar la forma con la que es avisado (color del mensaje, intensidad luminosa del mismo en la pantalla, sonido de alarma...).

10.4 Elementos constituyentes

Un sistema de ayuda a la conducción (CAS, en sus siglas en inglés) se considera formado por tres elementos fundamentales, según hemos visto anteriormente: un conjunto de sensores que recogen información del exterior, una unidad central de proceso de la información recogida, y un conjunto de elementos de comunicación con el usuario.

En la Figura 10-10 se muestran estos elementos, una vez instalados en un vehículo. Se trata del dispositivo EVT-300 comercializado por la empresa Eaton Vorad. Existen distintas configuraciones distintas, dependiendo del tipo de sistema, pero este ejemplo es suficientemente explicativo. En él se muestran la unidad central de proceso, situada en el motor, en lugar accesible, en el maletero o en la guantera. Desde ella salen conexiones a los diferentes elementos que recogen información del exterior. Y también está conectada a dos elementos de comunicación con el usuario. El primero de ellos está en el centro del salpicadero, accesible al conductor. El segundo está situado junto a un retrovisor lateral. En este último es donde se presenta información sobre obstáculos en el ángulo muerto de ese lateral. Al estar ubicado junto al espejo retrovisor izquierdo, el conductor puede visualizar el display al mismo tiempo que utiliza el espejo, es decir, en el momento de decidir si iniciar o no la maniobra.

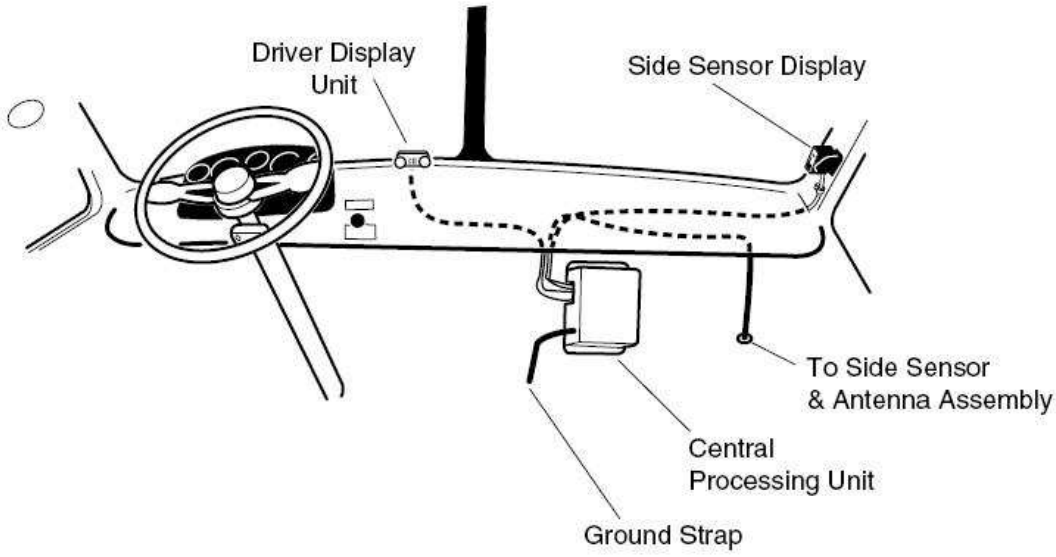


Figura 10-10. Partes constituyentes de un sistema de ayuda a la conducción

10.5 Tipos

Podemos diferenciar los dispositivos de ayuda a la conducción en diversas clases según diversos criterios. En primer lugar, podríamos hablar de las **funciones cubiertas** por cada uno de ellos. Existen dispositivos de ayuda a la navegación, de prevención de la somnolencia, de ayuda a las maniobras de aparcamiento (y otras maniobras precisas de baja velocidad), dispositivos de ayuda a la visión.

En relación con la presente investigación, son los **dispositivos de ayuda a la visión** del conductor los que nos interesan. Estos aparatos pueden facilitar la maniobra de incorporación o cruce en disposiciones oblicuas y de falta de visibilidad. A continuación se muestra una figura que ilustra cómo el sensor es capaz de detectar un vehículo en el ángulo muerto, es decir, cuando al conductor le resulta imposible darse cuenta de él.

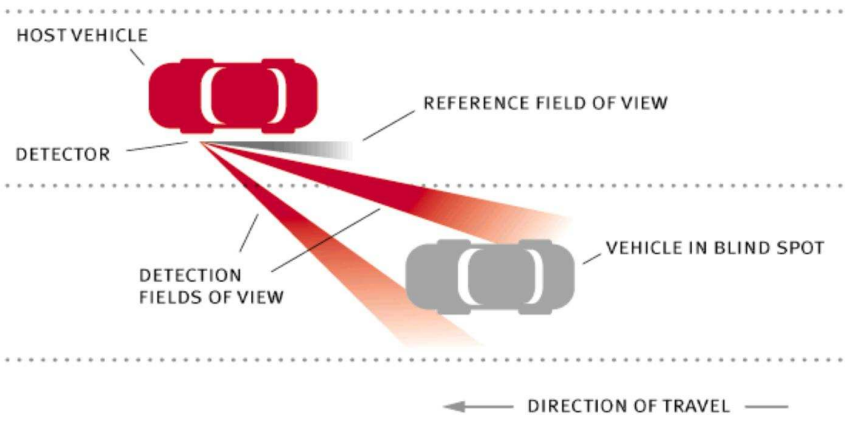


Figura 10-11. Sensor detectando un vehículo en el ángulo muerto

A su vez, los dispositivos de mejora de la visión del conductor pueden clasificarse. A continuación se establecen algunos criterios posibles.

10.5.1 Según el área cubierta

En primer lugar, podríamos clasificar estos dispositivos en función del área, alrededor del vehículo, de la que extraen información.

De esta manera tenemos dispositivos cuyos sensores están **orientados hacia la parte delantera** del vehículo. Estos dispositivos permiten detectar la presencia de obstáculos en la trayectoria del vehículo, tanto inanimados como objetos en movimiento.

También podemos encontrar dispositivos destinados a extraer información de la **parte trasera** del vehículo. Si el rango de observación es alto, permiten detectar un alcance antes de que éste se produzca, al detectar un vehículo rápido acercándose desde atrás. Si son de rango pequeño, su utilidad es más patente en maniobras de marcha atrás, tales como aparcamientos.

Por último, los **dispositivos que observan los laterales** del vehículo. Ésta es la zona que más problemas de visibilidad plantea al conductor. Este tipo de sensores cubren el ángulo muerto y son muy útiles en maniobras de cambio de carril e incorporaciones.

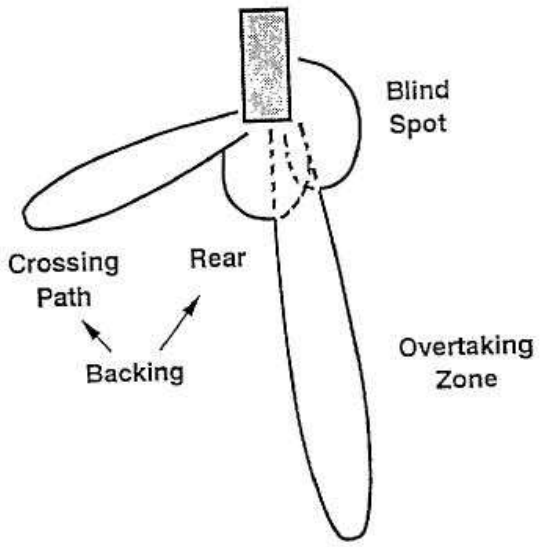


Figura 10-12. Áreas cubiertas por los dispositivos de ayuda a la conducción

Un aspecto importante a señalar es que el campo de detección necesario para las incorporaciones y cruces oblicuos, **es el campo más amplio**, tanto en ángulo cubierto como en distancia desde el vehículo. Para otro tipo de maniobras, los campos de detección son mucho más reducidos. Por ejemplo, los sensores de ayuda a la maniobra de aparcamiento, pueden ser eficientes con una distancia de detección de unos pocos metros. Mientras que para que un sistema sea capaz de detectar a otro vehículo que circula por otra vía, pero con el que se cruza en la próxima intersección, debe cubrir un área muy grande.

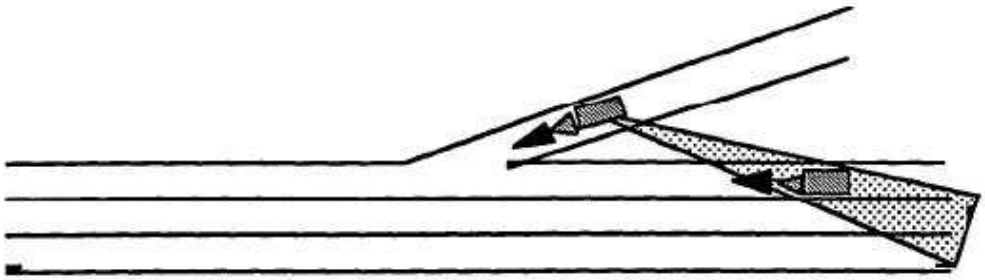


Figura 10-13. Ángulo de detección necesario para una maniobra de incorporación

Si el sistema tiene un gran ámbito de detección, es posible que se aumenten las falsas alarmas, pues en esa zona pueden existir todo tipo de objetos. Para ello hace falta una mayor capacidad de procesamiento de la información. Esto hace que, a día de hoy, los sistemas que ayudan a realizar las maniobras de incorporación y cruce estén en fase de desarrollo. Todavía queda mucho que avanzar en este sentido, mientras que otros sistemas, como los que ayudan a realizar cambios de carril, adelantamientos, y estacionamientos, ya están en fase de comercialización.

10.5.2 Según el tipo de sensor

Para detectar objetos en el entorno del vehículo, pueden describirse dos tipos de sensores: pasivos y activos (Moffa y otros, 1996).

Los sensores pasivos son aquellos que no utilizan su propia fuente de emisión de energía, sino que aprovechan la energía medioambiental o la que los propios obstáculos pueden emitir. Tal es el caso del ojo humano, por ejemplo. La luz ambiental, proveniente del sol u otras fuentes de luz, es reflejada por los objetos del entorno. Nuestro ojo recibe esa luz reflejada, y la interpreta. También es el caso del oído humano, pues es un órgano que recibe las ondas generadas por las distintas fuentes de ruido del entorno.

Entre las tecnologías pasivas, se encuentran las videocámaras, que registran la luz reflejada en los objetos, de manera similar al ojo humano. También algunos sensores de infrarrojos, que detectan los objetos emisores de calor (personas, vehículos en movimiento).

Los sensores activos son aquellos que además de tener un dispositivo de escucha, tienen uno de emisión de energía (sónica o electromagnética). De este tipo es el sistema auditivo del murciélago, que emite ultrasonidos y escucha el reflejo de estos en el ambiente.

Entre las tecnologías activas, se encuentran el radar y el sónar. El radar emite ondas electromagnéticas, mientras que el sónar emite ondas sónicas. Ambos utilizan bandas del espectro específicos, para disminuir las interferencias, y evitar las bandas que son detectables por los sentidos humanos.

El funcionamiento de los sensores activos puede resumirse de la siguiente manera. El sistema emite un impulso de corta duración, y luego espera a recibir el reflejo tras la interacción con los objetos en el campo de actuación. Como la velocidad de propagación el impulso es conocida, midiendo el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción es

suficiente para conocer la distancia a la que se encuentra el objeto. La precisión en las medidas es proporcional a la duración del impulso emitido, por lo que se utilizan pulsos relativamente cortos.

Para calcular la velocidad del objeto, pueden usarse dos métodos. El más simple es medir la distancia a intervalos de tiempo conocidos, y calcular la velocidad como la variación de esa distancia en el tiempo. Pero hay otra opción, que se basa en el efecto *Doppler*. Cuando la onda es reflejada por un objeto en movimiento, dicha onda varía su frecuencia. El cambio en la frecuencia es proporcional a la velocidad relativa entre el emisor y el objeto.

Si comparamos estas dos tecnologías, los sensores pasivos son mucho más simples que los activos. No tienen su propia emisión de energía, por lo que no tienen problemas de interferencias. Sin embargo, requieren de una alta capacidad de procesamiento para interpretar las señales recibidas y traducirlas en la posición y velocidad de los objetos cuyas radiaciones están siendo recibidas.

La inclusión de un procesador suficientemente potente para la interpretación de las señales recibidas supone un incremento del coste de estos sistemas, hasta el punto de hacerlos inviables hoy día. Una alternativa es involucrar al cerebro del conductor en ese procesamiento. Con esta opción, el sistema presenta la información recibida, a través de un monitor, y espera que el conductor la analice e interprete. Esto tiene el inconveniente de aumentar la carga de trabajo mental del conductor, y ser una fuente de distracciones.

10.6 Sensores de detección

Existen diversos tipos de sensores o sistemas de detección, que utilizan diferentes tecnologías. Ruff (2001) describe las características, ventajas e inconvenientes de cada uno de los sistemas con posibilidades de implantación.

10.6.1 Video-cámaras

El uso de cámaras de video comienza a ser una opción razonable, gracias a los avances realizados en los últimos años. Se han reducido considerablemente el coste y el tamaño de estos aparatos.

Figura 10-14. Equipo formado por una videocámara y un monitor

Usualmente, pueden ser necesarias dos o tres videocámaras para observar todos los ángulos muertos alrededor del vehículo. Un buen sistema de vigilancia, mostrará la información recogida para el conductor, a través de una **pantalla**. Esta pantalla debe tener la capacidad de alternar entre la visión obtenida con cada una de las tres cámaras. Incluso sería bueno que el sistema pudiera elegir automáticamente, la cámara más útil en función del tipo de maniobra que se esté realizando. La tecnología de los monitores también ha avanzado mucho en los últimos años, reduciendo tamaños y costos. Están disponibles monitores con tubo de rayos catódicos (*cathode ray tube* = CRT), así como monitores de cristal líquido (*liquid crystal display* = LCD).

El empleo de video cámaras es una tecnología muy eficiente, puesto que es fácil de usar. El conductor entiende fácilmente la información recibida. En realidad, una cámara funciona de manera similar a los espejos retrovisores.

En la Figura 10-15 se muestra un ejemplo de colocación de videocámaras como parte funcional de un sistema de ayuda a la conducción. Hay tres videocámaras que cubren diferentes ángulos de visión. Además, existe una cámara adicional que observa al conductor. Sirve para detectar estados de somnolencia. El sistema se complementa con un emisor láser.

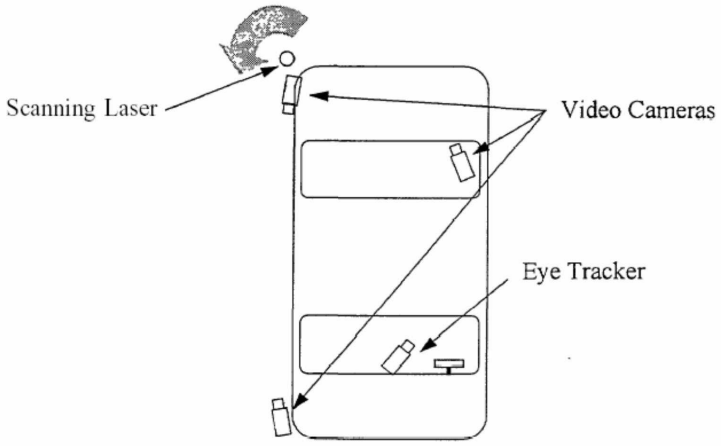


Figura 10-15. Ejemplo de situación de las videocámaras en un vehículo

No obstante, este tipo de sensores presentan algunos **inconvenientes**. En primer lugar, necesitan de un cierto mantenimiento. Actualmente no existen sistemas que tengan una vida útil aceptable. Las vibraciones y choques pueden dañar fácilmente tanto a la cámara como a los monitores.

Es necesario limpiar las lentes con frecuencia. Aun así, el sistema no servirá de gran ayuda en condiciones meteorológicas adversas: lluvia, nieve, niebla.

Por otro lado, las videocámaras por sí solas no son capaces de alertar de un peligro. Es un sistema de detección, pero no de alarma. Por ello, debe complementarse con otro sistema (por ejemplo, de ultrasonidos o radar) que sea capaz de detectar obstáculos, y avisar al conductor. En ese momento, éste puede observar el obstáculo a través de la cámara.

Otra opción sería incluir un **programa de visión artificial** en el sistema, que sea capaz de interpretar las imágenes enviadas por la cámara. Pero estos programas requieren de gran capacidad de computación, y aún están en una fase muy inicial de investigación y desarrollo.

10.6.2 Radar

Esta tecnología consiste en la **emisión de ondas electromagnéticas** y escuchar el reflejo o eco de esas ondas en el entorno. El nombre proviene del inglés *radio, detecting and ranging*.

La emisión se realiza a través de una **antena** dirigida a la zona que se desea monitorizar. La energía emitida es muy baja en intensidad, para que no sea dañina. La recepción se realiza en otra antena, convenientemente situada, y un conjunto de chips que procesan la información recibida.

Estos sistemas pueden detectar personas, edificios, y vegetación. Además, son particularmente efectivas detectando objetos metálicos, como otros vehículos. El sistema puede alertar al conductor cuando un obstáculo es detectado, e incluso informarle de la distancia a la que se encuentra de él.

Las **ventajas** de esta tecnología es su bajo precio, fiabilidad en las condiciones ambientales más adversas, y fiabilidad en la detección de obstáculos.

La **desventaja** principal es la probabilidad de falsas alarmas. Puede generarse una falsa alarma cuando el sistema detecta un objeto lejano, confundiéndolo como uno cercano, o bien identifica un objeto que en realidad no existe. Si se generan muchas falsas alarmas, el sistema pierde credibilidad, y el conductor puede optar por ignorar al sistema, haciéndolo inútil.

Una alternativa es utilizar el radar conjuntamente con las videocámaras, de manera que el conductor pueda contrastar la información obtenida con uno y otro sistema. Si se trata de una falsa alarma, el conductor puede observarlo a través de las cámaras. Si la alarma es real, la videocámara puede aportar algo más de información sobre el tipo de objeto detectado.

Existen diferentes tipos de radares, según el espectro de onda utilizado. Usualmente el radar opera en longitudes de ondas muy bajas (del orden de los milímetros), esto es, una frecuencia de entre 1 GHz hasta 100 GHz. Recientemente se están aplicando otras bandas de frecuencia, en sistemas que se denominan *lidar* (*light detection and ranging*). Estos sistemas utilizan láser, con frecuencias entre 10 y 60 MHz.

A continuación se muestra un ejemplo: el detector de ángulo muerto ALIRT. Éste utiliza ondas infrarrojas para detectar la energía térmica irradiada por las ruedas al friccionar con el pavimento. Por lo tanto, es muy adecuado para detectar vehículos en movimiento.

Figura 10-16. ALIRT Blind Stop Detector

10.6.3 Sonar

Es una tecnología muy similar al radar. La diferencia radica en que el tipo de ondas emitidas no son electromagnéticas, como en el radar, sino que se trata de **ondas sónicas**: infrasonidos o ultrasonidos.

10.6.4 Identificación por radiofrecuencia

Este sistema no es operativo actualmente. Consiste en la instalación de un **emisor de radiofrecuencia en cada vehículo**, que emite una onda característica e identificadora del mismo. De esta manera, el resto de vehículos puede detectar fácilmente su presencia, su posición y velocidad, con un receptor de radiofrecuencia.

Este sistema exige que todos los vehículos tengan instalado el sistema. Además, sería conveniente instalarlo también en otros **obstáculos fijos** de la carretera. Llegándose al punto de que cada elemento de la vía, tanto si es inmóvil, como si es un usuario de la misma, emita una señal identificadora, que permita al resto conocer su posición y velocidad en todo momento.

Se trata de un sistema caro, inviable, pero sería el sistema definitivo. Actualmente sólo tiene **aplicación** en recintos cerrados de acceso restringido, como explotaciones mineras, zonas de carga y descarga de mercancías, y, en general, industrias con movimiento de maquinaria. En estos casos, la maquinaria de la empresa es el único tipo de vehículos que circulan por el recinto, con lo que instalar el sistema en todos ellos es factible.

La probabilidad de falsas alarmas es escasa. Ante la ocurrencia de una alarma, ambos vehículos son alertados sobre el origen de la misma: la identificación del obstáculo es inmediata.

10.7 Instalaciones externas al vehículo

Además de mejorar los vehículos actuales con la instalación de diversos dispositivos en ellos, orientados a facilitar la conducción, es posible la **mejora de la infraestructura**, instalando sistemas con diversas funciones (Martín y otros, 2000).

Un ejemplo de estos sistemas se ha comentado anteriormente, al hablar de la **identificación por radiofrecuencia**. Podemos dotar los objetos que hay en la vía, tales como señales, barreras de seguridad, puentes, pintura de la calzada,… de una señal de radio propia e identificadora. El vehículo, al circular por la vía, recibe esas señales, y conoce en todo momento la situación de esos elementos, y la propia situación del vehículo respecto a esos elementos.

Los sistemas de detección de pérdida de trayectoria serían mucho más eficientes si los hitos situados a ambos lados de la vía emitieran algún tipo de señal. El sistema sabría en todo momento si circula centrado en el carril o no.

El sistema de posicionamiento global *GPS* (*global positioning system)***, además de sus múltiples aplicaciones en otros campos, también es aplicable aquí. La puesta en órbita de los satélites necesarios, emitiendo su señal característica, permite que cualquier receptor situado en la superficie conozca su posición con bastante precisión. Un receptor de este tipo instalado en un vehículo, proporciona en todo momento la posición del mismo en la vía. También la posición respecto a la ruta deseada. También sirve para avisar de la presencia de intersecciones próximas. Este es un ejemplo de funcionamiento conjunto de equipos dentro y fuera del vehículo.

Algunas carreteras emiten ya por **radio** información general sobre el estado de la vía. Esa información puede ser recibida por un receptor de radio convencional. Entre la información recibida pueden incluirse datos meteorológicos, del nivel de tráfico, del estado del pavimento, de la presencia de obstáculos en la vía (tales como accidentes, tramos de circulación lenta, o desprendimientos de roca) y otros peligros.

Otro equipo cuyo uso se está investigando consistiría en un **sistema inteligente de gestión del tráfico en intersecciones**. El sistema detectaría por radar, o mediante espiras electromagnéticas en la calzada, la presencia de los vehículos aproximándose a la intersección. En función de unos criterios, puede operar adecuadamente los semáforos para disminuir la demora en los mismos y aumentar la capacidad. En intersecciones sin semáforos, el sistema podría activar una señal que indicase a los vehículos de la vía sin preferencia que no deben intentar la maniobra de incorporación o cruce (hasta que no pasen los vehículos con preferencia). Esa señal puede ser complementada con una emisión de radio, que es recibida por el sistema inteligente del vehículo, y es éste el que avisa al conductor de que dicha maniobra es inadecuada. Estos sistemas evitarían accidentes en maniobras de intersección y cruce debidos a falta de visibilidad o a un error en la valoración del hueco.

Como valoración, estas instalaciones en la infraestructura suponen un incremento en el coste de construcción, explotación y mantenimiento de la misma, de la misma manera que los sistemas instalados en el vehículo aumentan el precio del mismo, y los costes de mantenimiento y reparación. Pueden ser realmente beneficiosas en función de la cantidad de tráfico al que den servicio, y la mejora de comodidad y seguridad que consigan.

10.8 Procesamiento de la información

El procesador es el núcleo de cualquier sistema de ayuda a la conducción (Moffa y otros, 1996). Recibe información de los sensores, la procesa, y envía los resultados al conductor por medio de la interfaz. En la Figura 10-17 se muestra el funcionamiento de estos núcleos de proceso, que integran diversos chips con diferentes funciones.

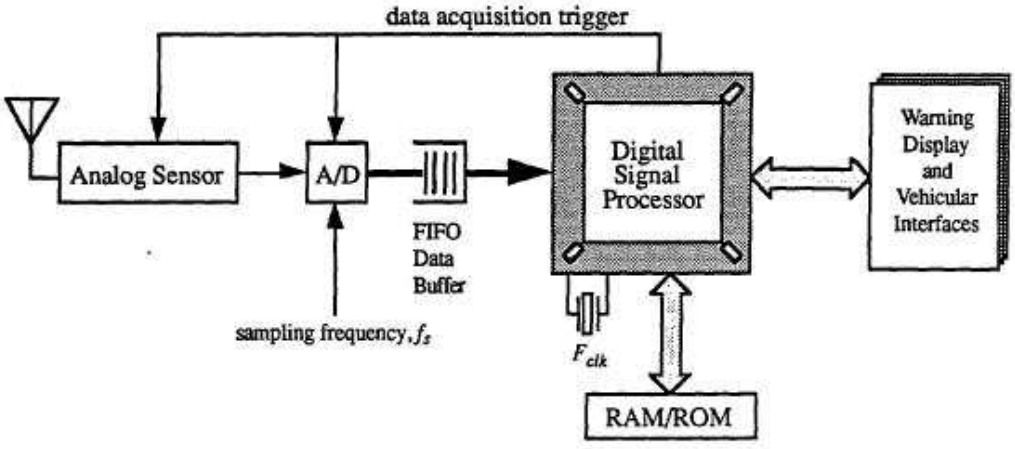


Figura 10-17. Esquema de funcionamiento del procesador

El sistema funciona a la velocidad establecida por la frecuencia del reloj f_s que también define la velocidad de **flujo de información**. El sensor analógico recibe la información sin procesar, proveniente de los sensores (videocámaras, radares). El

convertidor analógico-digital traduce esa información a un formato que puede entender el procesador. La información traducida se almacena temporalmente en un *buffer* tipo *first-in-first-out*, que actúa de "sala de espera". Este almacenamiento intermedio permite que el procesador digital opere con uno de los estados o paquetes de información, mientras el procesador analógico va recibiendo el siguiente paquete. Ambos chips trabajan simultáneamente, reduciendo el tiempo total de proceso.

Durante el procesamiento digital de la información, el procesador digital utiliza una **memoria** de tipo RAM en la que almacenar los resultados de sus operaciones. La memoria ROM no puede modificarse, y en ella están escritas las instrucciones que debe completar, los algoritmos y esquemas de operaciones que definen el funcionamiento del sistema.

Estas operaciones que tiene que realizar el procesador pueden tener diferente grado de **complejidad**. El objetivo es que el sistema sea capaz de interpretar la información recogida, y discriminar entre las situaciones peligrosas, en las que debe avisar al usuario, de las que no lo son. La eficacia del sistema puede medirse estudiando la aparición de **falsas alarmas**, es decir, advertencias de seguridad innecesarias; y también la ausencia de alarma en una situación que sí sea necesaria una advertencia al usuario.

El sistema tendrá unos **umbrales de detección**, que sirvan para diferenciar qué señales corresponden a obstáculos reales, diferenciándolas del ruido detectado. En el siguiente ejemplo (Figura 10-18) se muestra la señal recogida por el sensor, y el umbral de detección, para el sistema comercial Alirt, que funciona mediante infrarrojos.

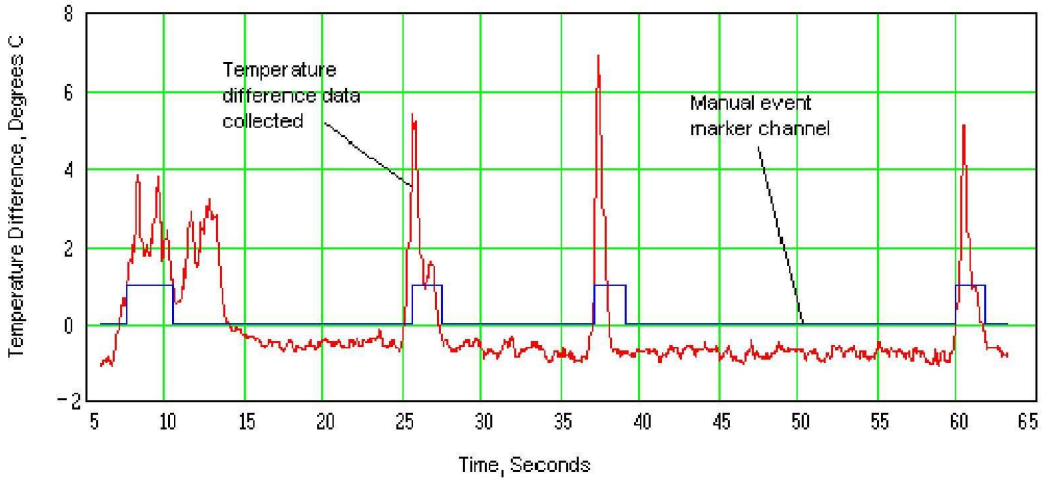


Figura 10-18. Ejemplo de señal recibida por un CAS y los umbrales de detección

En el ejemplo anterior, una alarma es generada cuando la señal recibida (rojo) es superior a un umbral (azul). Este caso es sencillo pues sólo se está recibiendo una variable escalar: la diferencia de temperatura de esa zona del pavimento respecto del resto. Las zonas calientes corresponden a vehículos en movimiento.

En otros casos, el sistema tiene que evaluar dos variables simultáneamente, para determinar si existe peligro o no. Tal es el caso de un sensor que reciba la distancia y velocidad relativa de los distintos vehículos. Es necesario definir un **criterio** en el plano distancia-velocidad según el cual la situación es peligrosa, y se genera una alarma; y diferenciarla de aquellas parejas de valores distancia-velocidad que son seguras. En el siguiente diagrama se muestra una propuesta de algoritmo de este tipo (Figura 10-19). Para distancias cortas, la alarma se genera sea cual sea la velocidad. Para grandes distancias, sólo se genera alarma si la velocidad relativa es muy grande.

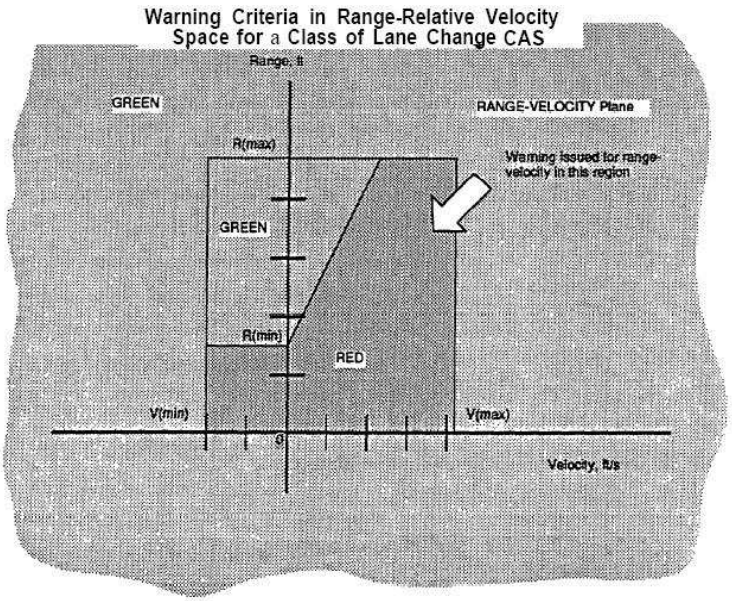


Figura 10-19. Criterio distancia-velocidad relativa para generar una alerta

Como vemos, estos criterios deben ser suficientemente sencillos para ser evaluados con rapidez por el procesador. Dichos criterios deben estar preestablecidos en fábrica, según valores suficientemente estudiados experimentalmente. No obstante, puede darse la posibilidad de que el usuario reajuste estos criterios según sus preferencias.

El sistema también debe ser capaz de situar los diferentes obstáculos detectados, respecto del vehículo. Es muy importante reconocer las trayectorias de los distintos vehículos detectados, y relacionarlas con la geometría de la vía. De esta manera el sistema es capaz de distinguir en qué carril se encuentra cada vehículo, y si existe riesgo de colisión.

En la Figura 10-20 se ilustran estas observaciones. El sensor situado en el camión debe detectar que se encuentra en una curva, y distinguir el camión que se encuentra estacionado, el turismo que circula por el mismo carril que el camión, y el otro turismo que circula a más velocidad, por el carril rápido.

Figura 10-20. El dispositivo debe poder situar cada obstáculo detectado en el carril correspondiente

Como comentario final de este apartado, hemos de considerar el **tiempo requerido** de proceso. El sistema debe evitar un accidente, por lo que es necesario que realice todas estas operaciones en el menor tiempo posible. De esta manera, todavía le queda tiempo suficiente al conductor a percibir la señal de alerta, tomar la decisión adecuada, y llevarla a cabo. No sirve de nada un sistema que alerta del peligro cuando ya es demasiado tarde para evitar el accidente. Esto condiciona la potencia requerida para los procesadores de cálculo.

10.9 Interfaz de usuario

Entre el sistema de ayuda y el conductor debe establecerse un **flujo bidireccional de información**. Para ello se utilizan monitores, señales acústicas, pantallas con indicadores de colores, parpadeantes o no, etc. El usuario, a su vez, puede reajustar el sistema, adaptándolo a sus necesidades, mediante algún sistema de controles por botones, teclados, mandos giratorios, tornillos, etc.

Mazzae y Garrot (1995) recopilaron algunos modelos de paneles de información o *displays* donde mostrar la información recogida por los sensores, como los que se pueden ver en las siguientes fotografías.

Figura 10-21. Interfaz situado en el panel frontal del vehículo

El panel mostrado en la Figura 10-21 se coloca enfrente de la posición del conductor, con lo que en principio es más visible, pero, realmente en el caso de realizar una maniobra lateral, el conductor va a mirar constantemente a los retrovisores, de modo que resulta más acertada la situación de este panel **junto al retrovisor**, ya sea bajo él o junto a él, ya que el funcionamiento será similar (Figura 10-22 y Figura 10-23).

Figura 10-22. Interfaz situado bajo el retrovisor lateral

Figura 10-23. Interfaz colocado junto al retrovisor lateral

En este otro ejemplo (Figura 10-24), se muestra un esquema del vehículo (en este caso, un camión articulado con remolque). Junto al esquema, una luz amarilla indica la situación del obstáculo más cercano. Unos dígitos luminosos indican **la distancia hasta dicho obstáculo**. En el mismo panel se sitúan algunos controles para configurar el sistema: el volumen de las alarmas sonoras, la distancia a partir de la cual se activa la alerta, etc.

Figura 10-24. Interfaz con indicación de distancia al obstáculo, y señal sonora

Sistemas más sofisticados pueden presentar una **pantalla** de cristal líquido (LCD) donde reflejar los mensajes. Este sistema permite una interfaz gráfica de usuario (GUI, en sus siglas en inglés) más agradable. Las posibilidades son mucho mayores que con un panel formado por luces tipo LED (pequeños diodos emisores de luz). En una pantalla se puede representar cualquier tipo de mensaje gráfico.

Existen pantallas que, además de poder mostrar los mensajes en ellas, son **traslúcidas**. Presentan la ventaja de no obstruir la visión del conductor, pero el inconveniente de que los mensajes mostrados se mezclan con la imagen de fondo. Esto hace que sean mucho menos legibles. En el siguiente ejemplo se muestra una pantalla de este tipo. A la izquierda de la Figura 10-25, junto al retrovisor central, hay un pequeño cristal con los mensajes del sistema. En este caso el mensaje es una señal de "stop", que

indica la proximidad de un cruce con este tipo de señal. Para diferenciar bien la señal de la interfaz de una señal real, la del *display* es de color amarillo, mientras que una real sería de color rojo. Es un mensaje sencillo, fácilmente entendible, que se distingue claramente de la imagen de fondo. Al fondo de la imagen se percibe la intersección, y la señal real.

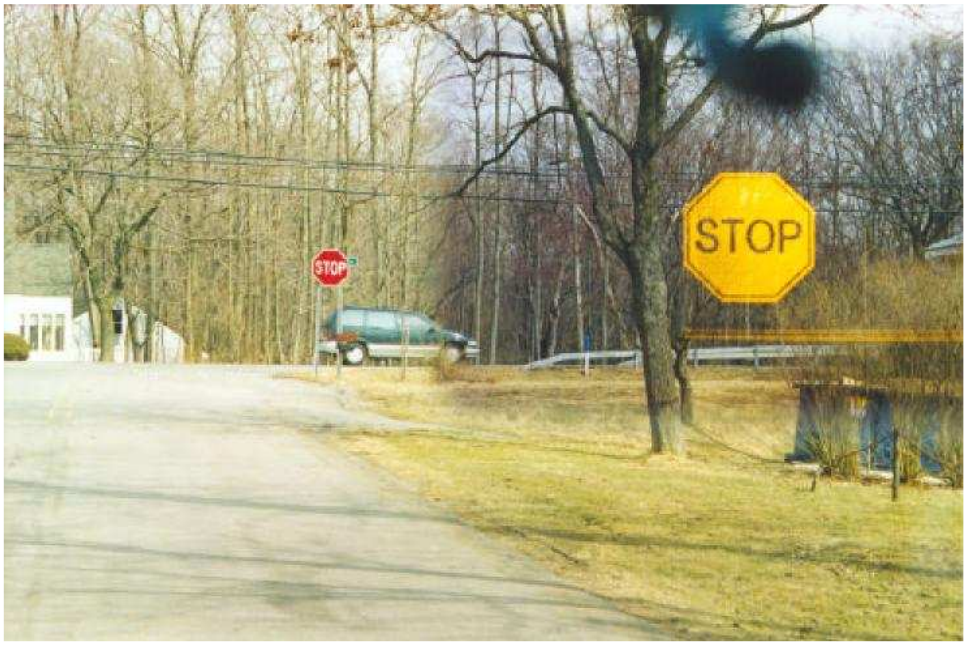


Figura 10-25. Interfaz formada por un panel traslúcido, advirtiendo de la proximidad de un "stop"

Algunos aspectos son importantes para evaluar el correcto diseño de estos sistemas de comunicación. Mazzae y Garrot, en 1995, los resumen en los siguientes **criterios de evaluación de interfaces**.

- Ser extremadamente simple y fácil de usar.
- Proporcionar una alerta visual al conductor. Dicha alerta visual debe situarse cerca de la línea de visión del conductor hacia sus espejos retrovisores.
- También debe proporcionar una alerta sonora. Dicho sonido debe ser audible en diferentes niveles de ruido ambiental.
- En situaciones de colisión inminente, ambas señales (visual y sonora) deben darse simultáneamente.
- En situación de peligro no inminente, puede ser suficiente con una advertencia visual.
- La señal sonora sólo debería proporcionarse cuando haya indicios claros de que el conductor va a realizar la maniobra. El indicio más adecuado es encender el intermitente, pues es una declaración explícita de intenciones por parte del conductor. No obstante, algunos conductores no usan estos intermitentes, por lo deben ser evaluados otros indicios, por ejemplo, un cambio evidente en la trayectoria, o un giro de volante.
- La señal visual más adecuada es una luz roja para situaciones de alerta.
- Pueden usarse luces de color ámbar para situaciones de prealerta, siempre y cuando el ámbar se diferencie claramente del rojo.

- El sistema debe informar, de alguna manera, de que está activo, encendido, y funcionando correctamente. Por ejemplo, con la luz ámbar encendida siempre que no haya una alerta (y se encienda la roja), o iluminando la pantalla con algún otro color.
- Adicionalmente, es recomendable instalar un icono indicativo relativo al sistema, junto con el resto de indicadores que se muestran en el salpicadero. El icono permanecería sin iluminar si el sistema funciona correctamente, pero se iluminaría en rojo si se detecta algún fallo. En este sentido es similar a los indicadores de la batería o el nivel de aceite.
- El usuario debe tener la oportunidad de regular el volumen de la señal acústica, así como la intensidad lumínica de las señales visuales.

En "Preliminary human factors guidelines for crash avoidance warning devices", (U.S. Department of Transportation, 1996) se dan más ideas sobre la interacción entre estos elementos y el conductor del vehículo. En realidad son unos consejos para un adecuado diseño de esta interfaz de usuario. Se vuelve a hacer hincapié en presentar al conductor una **información sencilla, fácil de entender, que no sea molesta, y que aparezca en el momento en que es útil (no en otros momentos)**.

También se comenta que en sistemas complejos, con múltiples sensores, pueden darse lugar a alarmas simultáneas. En esos casos, el sistema debe decidir la alerta prioritaria, la más grave, y sólo presentar ésta, de manera que no se sobrecargue al conductor con demasiada información.

Las señales deben ser perfectamente configurables por el usuario. Él las adaptará a sus necesidades y preferencias. Es difícil establecer desde fábrica cuál es el nivel sonoro más adecuado. Sin embargo es muy fácil incluir un mando para ajustarlo al nivel deseado por el conductor.

Las señales de alarma deben aparecer en el momento adecuado, y desaparecer cuando el peligro ya no exista. Si las condiciones que generaron la alarma continúan dándose, entonces el sistema debería repetir la señal de alarma, con el fin de insistir al conductor para que tome las medidas necesarias.

10.10 Estimaciones coste-beneficio sobre su implantación

En el texto "Preliminary assessment of crash avoidance systems benefits" (VVAA, 1996), se realiza un análisis tipo coste-beneficio sobre la implantación de sistemas de ayuda a la conducción.

Estudian tres tipos de accidentes en los cuales la tecnología de ayuda a la conducción podría evitar una gran parte de ellos. Son los accidentes por alcance (*rear-end crashes*), accidentes en cambios de carril e incorporaciones (*lane change/merge crashes*) y los accidentes por salida de carretera (*single vehicle road departure crashes*). De acuerdo con la base de datos norteamericana de accidentes GES de 1994, estos tres tipos de accidentes suponen el 46% del total de accidentes con informes de policía.

El **beneficio** por la implantación de estos sistemas puede definirse de una manera muy sencilla:

$$B = N_{cas} \cdot N = f \cdot N$$

B: beneficio por la implantación de estos sistemas.

N_{cas}: número de accidentes con utilización de CAS (sistemas de ayuda a la conducción)

N: número de accidentes sin utilización de CAS

f: factor de reducción de accidentes.

Este último factor puede definirse como sigue:

$$f = PM \cdot U \cdot \int p(S) \cdot E(S) \cdot dS$$

PM: penetración de los CAS en el mercado del automóvil. Está relacionado con la cantidad de vehículos que lleven implementadas estas tecnologías.

U: factor de utilización de los CAS. Aunque el vehículo tenga instalado el sistema, hay que tener en cuenta que no todos los conductores lo utilizarán adecuadamente.

S: cada una de los tipos de accidentes que se pueden considerar, en el texto de estudio, hay tres tipos considerados.

p(S): probabilidad de que se dé un tipo determinado de accidente.

E(S): efectividad del CAS en un tipo determinado de accidente.

En este estudio preliminar, se asumen diversas simplificaciones e hipótesis. Entre ellas, la **penetración de mercado y el factor de uso** de los CAS se consideran iguales al 100% debido a la ausencia de datos.

A este respecto, Mazzae y Garrott (1995) evaluaron las reacciones durante la conducción y recogieron las opiniones de 8 conductores profesionales de camiones, que experimentaron la conducción de un tramo establecido con los retrovisores normales, con un espejo convexo y con dos sistemas de detección de obstáculos (uno con sensores basados en el radar y otro con sensores basados en los ultrasonidos). Según los resultados del experimento, los conductores no observaron mejoras con los nuevos dispositivos, pero sí con la colocación del espejo convexo. Por ello, los autores recomiendan la realización de otros experimentos similares para comprobar el beneficio de estos sistemas, y si los usuarios llegarían a usarlos de manera habitual.

La **efectividad** de los CAS para los accidentes por alcance se estiman mediante simulaciones de Monte Carlo y datos de recientes investigaciones llevadas a cabo por otros equipos científicos. El resultado es que estiman que estos dispositivos podrían evitar el 47% de este tipo de accidentes.

Por su parte, la efectividad en accidentes en cambio de carril e incorporaciones varía bastante de un autor a otro. Los autores asumen 37% como la mejor estimación.

Por último, un 24% de los accidentes por pérdida de control y salida de carretera podrían evitarse con el uso de estos dispositivos.

Para realizar un adecuado estudio coste-beneficio es necesario calcular el **coste económico de los accidentes**. Y para ello hay diversas formas de estudiar este aspecto. Existen elementos cuantificables, con precios de mercado, en los que el coste es fácil de calcular. Lo realmente difícil es añadir costes sociales no cuantificables, tales como el dolor, la pérdida de seres queridos, o efectos psicológicos diversos. Aunque existen métodos para estimar estos costes e incluirlos en un análisis global, hay mucha incertidumbre sobre su validez.

Por tanto, los autores deciden tomar los datos de un estudio anterior (Blincoe, 1996). Incluyen el coste directo de todos los bienes y servicios que es necesario comprar, gastar o reponer como resultado de un accidente en carretera: gastos médicos, servicios legales, reparación de la vía, terapias de rehabilitación para las personas afectadas, servicios de emergencia, servicios mecánicos de reparación de los vehículos, y el coste ocasionado a otros usuarios de la vía por los retrasos generados.

Blincoe (1996) estudia los costes en función del grado de severidad del accidente. Los menos graves son accidentes en los que sólo hay daños materiales, y los más graves, accidentes con pérdidas humanas.

Gravedad del accidente	Coste total (US $ en 1994)
Sólo daños materiales	1663
Sin heridos	1129
Heridos leves	7243
Heridos moderados	34723
Heridos graves	103985
Heridos severos	230042
Heridos críticos	706754
Fallecidos	831919

Tabla 10-1. Coste de cada accidente, en función de la gravedad del mismo

Según la formulación anteriormente desarrollada, los autores estiman que, sólo en EEUU, se podría evitar el gasto de 25600 millones de dólares al año (datos de 1994).

Para finalizar el estudio económico, hay que analizar los **costes de implantación de estos sistemas**, en todo el parque nacional de vehículos. O, al menos, en los vehículos nuevos vendidos a partir de ahora. Este coste es difícil de estimar pues todavía no existe un precio de mercado para estos productos (muchos están en fase de investigación). Por otro lado, al instalarlos en todos los vehículos, sería necesaria una producción muy grande, que daría lugar a economías de escala.

Lo que los autores hacen es plantear diferentes escenarios. En el más optimista, el coste de instalar un sistema completo de ayuda al conductor es sólo de 100$ por vehículo. En el más pesimista, este coste es de 2000$.

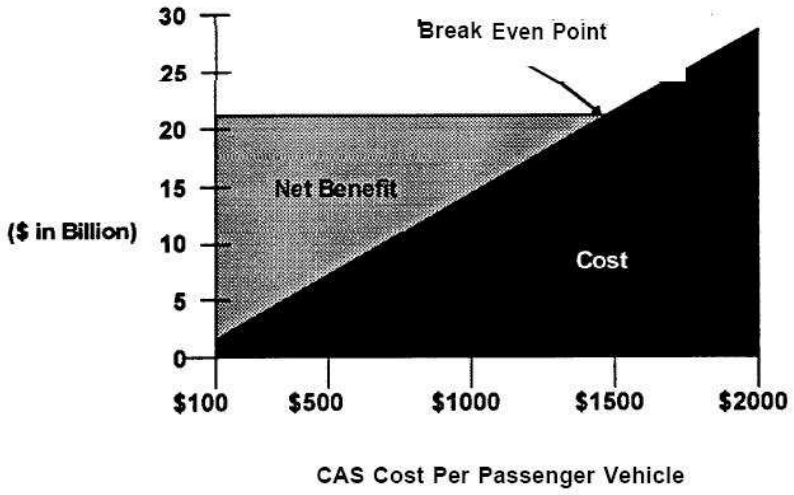


Figura 10-26. Beneficio de implantación de CAS, en función de su coste

Como podemos observar en el gráfico anterior, el beneficio neto resultante varía linealmente en función del coste de instalación de los CAS. Si este coste fuera menor de 1500$, que es el **punto de ruptura**, los sistemas serían rentables.

10.11 Líneas de investigación futuras

10.11.1 Sistemas con adaptación automática

Una nueva generación de sistemas se ayuda a la conducción está empezando a desarrollarse. Se denominan sistemas con adaptación automática al conductor. En inglés, collision avoidance systems with adaptive interface.

Estos sistemas adaptan su funcionamiento, en tiempo real, al entorno que rodea al vehículo, la situación de la vía, al estado del conductor, y a las intenciones del conductor. **El funcionamiento del CAS se adapta a la situación** en cada momento (Smith y Zang, 2004).

El sistema tiene en cuenta la carga de trabajo mental que el conductor tiene que hacer frente en cada momento, para determinar el contenido y el formato de presentación del mensaje que el sistema le envía.

En cada momento, al conductor se le exige una concentración distinta, en función de la complejidad de la maniobra necesaria, y de la carga de tráfico existente en la vía. Si el conductor necesita estar concentrado, no es conveniente que el sistema alertándole por cualquier obstáculo, pues son fuentes de distracción. De la misma manera, cuando el conductor realiza una conducción rutinaria, casi subconsciente, es necesario que el sistema le alerte del más mínimo imprevisto, para llamar su atención sobre la conducción. Por ejemplo, durante una maniobra de adelantamiento, el sistema no debería mostrar información sobre la ruta a seguir, ni dejar entrar llamadas por teléfono, ni informar del estado meteorológico.

Piersma (1993) hace una lista de fuentes de información sobre las cuales estos sistemas pueden adaptarse:

- preferencias del usuario,
- tareas secundarias,
- carga de trabajo mental del usuario,
- situación del tráfico,
- maniobras en desarrollo, y
- historial de eventos anteriores (experiencia previa).

Detectar los **intentos de maniobras por parte del usuario** sería un aspecto clave en este proceso (Smith y Zang, 2004). Un "intento" es la determinación que adopta el conductor de realizar una determinada maniobra (por ejemplo, un cambio de carril) en un futuro inmediato (de 3 a 5 segundos). Si el sistema es capaz de intuir lo que el conductor desea hacer, puede ser capaz de proporcionarle la información necesaria para esa maniobra. El conductor podría indicarlo expresamente mediante la activación de un control, por ejemplo, activar el intermitente antes de realizar una maniobra. En ese caso, el sistema tiene una señal inequívoca de sus intenciones. No obstante, hay muchos usuarios que no usan correctamente sus intermitentes. Además, hay muchas maniobras que no requieren señalización previa.

Así pues, el sistema puede utilizar los intermitentes como principal fuente de información, pero no restringirse sólo a estos. Otras fuentes de información pueden ser pequeños cambios en la trayectoria o en la velocidad, actuaciones bruscas sobre el volante, cambios en la posición de los pies sobre los pedales, pequeños cambios de postura del conductor, un aumento en la frecuencia de miradas sobre los retrovisores, la presencia de una intersección próxima, o un vehículo lento precedente.

Si el sistema detecta el intento de realizar una maniobra compleja, puede inferir que el conductor está suficientemente alerta para realizarla. En tal caso, es recomendable no distraerlo con mensajes de escaso interés y baja prioridad.

Esto también sirve para disminuir la aparición de falsas alarmas. Las falsas alarmas, además de distraer y confundir, son molestas, y disminuyen la credibilidad del sistema.

Un **sistema de detección de desviaciones de la trayectoria** sirve para evitar salidas de carretera. Estos sistemas pueden llegar a provocar muchas falsas alarmas, puesto que hay grandes diferencias entre la manera de mantener la trayectoria, de unos conductores a otros. Con el fin de evitar esta situación, el sistema debe ser capaz de diferenciar las desviaciones de la trayectoria que son involuntarias, de las voluntarias (para realizar un cambio de carril, estacionar, evitar un obstáculo, etc.). Así mismo, debe poder adaptarse al estilo de conducción del usuario.

Un **sistema de detección de vehículos en el ángulo muerto**, por su parte, sirve para advertir al conductor de la presencia de un vehículo en una zona que no puede ver directamente, ni a través de sus espejos retrovisores. Sin embargo, continuamente hay vehículos que entran y salen del ángulo muerto. Si el sistema da una alerta cada vez que esto ocurre, este tipo de alertas se convierten en algo molesto e inútil. Sin embargo, si el sistema es capaz de intuir cuándo el conductor quiere cambiar de carril, entonces sólo presenta la alerta si es necesaria, justo antes de la maniobra.

10.11.2 Vehículo inteligente

Se analiza a continuación el esfuerzo realizado por la FHWA en el programa de iniciativas hacia el vehículo inteligente, que se puede consultar en el texto escrito por la FHWA, "Preliminary Human Factors for the Intelligent Vehicle Initiative Program, Identification of Human Factors Research Needs" (1998).

Acerca de la disponibilidad del vehículo inteligente, se plantean **tres generaciones de vehículos** que cumplirán unos objetivos determinados:

- Generación I: Aviso al conductor e información.
- Generación II: Generación I + control limitado y funciones de asistencia al conductor.
- Generación III: Generación II + automatismo de algunas o todas las funciones.

Según éste estudio, la generación I llegaría en 2003 aproximadamente, la II de 2004 a 2008 y la III de 2009 a 2013. Eso no quiere decir que a fecha del texto no existieran ya prototipos, pero la incorporación a los automóviles de calle aún no se había realizado (de hecho en el 2006 aún es un tema poco usual para la gente de a pie).

En la primera generación, los sistemas sólo resultan una ayuda al conductor, proporcionando información que, de otra manera, le resultaría difícil de conseguir. Las siguientes generaciones pretenden incorporar **sistemas de control automático del vehículo**. El sistema no se limita a informar al conductor, sino que toma decisiones automáticamente, y opera sobre el vehículo según unos criterios prefijados.

En las primeras fases, este control estaría limitado a algunas funciones en situaciones específicas. Algunos ejemplos de estas aplicaciones ya se comercializan en algunos modelos de vehículos. A continuación se citarán algunas:

- El sistema puede frenar el vehículo para evitar choques en las maniobras de aparcamiento, si el obstáculo se encuentra demasiado cerca.
- El sistema enciende automáticamente el limpiaparabrisas si se detecta alguna precipitación atmosférica.
- El sistema enciende automáticamente la luz de cruce cuando la luminosidad ambiental es reducida.
- El sistema limita la velocidad en función del tipo de vía por la que se circula, impidiendo que se alcancen velocidades excesivas.
- El sistema limita la velocidad en función del trazado de la vía. Si se circula por una curva pronunciada, el sistema limita la velocidad para evitar que se pierda el control del vehículo.
- El sistema reajusta la velocidad de giro de las ruedas, si se detecta pérdida de fricción en alguna de ellas, para evitar la pérdida de estabilidad.

Como vemos en todos estos ejemplos, el control final del funcionamiento del vehículo corresponde al conductor. El sistema sólo actúa sobre algunas partes del vehículo, en circunstancias concretas, con criterios claramente definidos.

El último paso sería conseguir la automatización total de la conducción. En esta fase, **el conductor se convierte en un supervisor del sistema**. Es el sistema el que actúa sobre el vehículo de la manera adecuada, evitando accidentes, escogiendo la ruta más adecuada, y proporcionando una conducción segura y cómoda. El sistema hace las tareas del conductor. En realidad, la automatización de la conducción es posible en la medida en que conducir es una tarea rutinaria, fácilmente programable. Aunque de momento, este último paso pertenece al campo de la ciencia ficción.

En un texto del US DOT (1999), que aparece en su página web, se describen los vehículos del futuro, con todos estos sistemas implementados y en funcionamiento.

Para el caso de **turismos y vehículos ligeros** (Figura 10-27), es necesario realizar un esfuerzo para cubrir el amplio rango de posibilidades en cuanto a características del vehículo y del conductor. No obstante, los sistemas relativos a accidentes por alcance, cambios de carril e incorporaciones, salidas de carretera, y accidentes en intersecciones están en un grado avanzado de desarrollo. Ya se han diseñado y probado, con buenos resultados. En realidad, algunos fabricantes de automóviles ya los incorporan en sus productos.

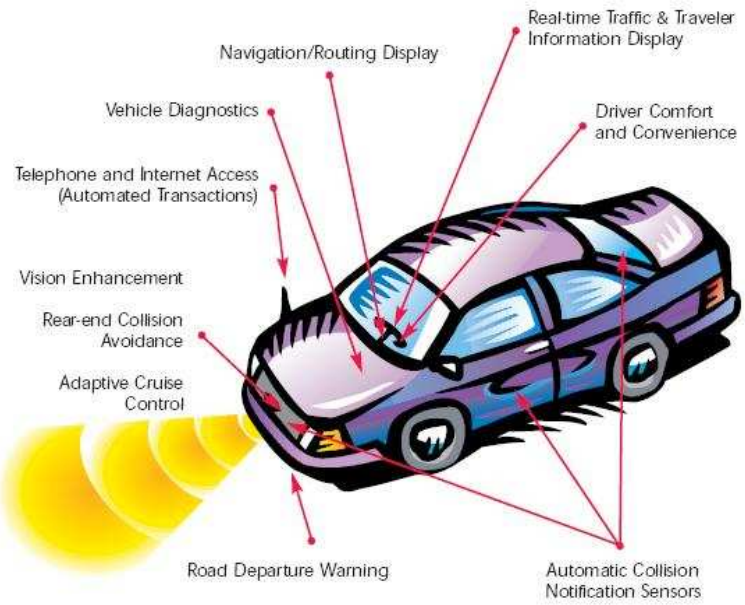


Figura 10-27. Turismo equipado con estos sistemas

En cuanto a los **vehículos de transporte de mercancías**, estos sistemas incorporan mejoras que interesan tanto a los conductores como a las empresas que operan en el sector. Tras una inversión inicial, la empresa se ve beneficiada, a la larga, por una mejor fiabilidad de sus vehículos, menor tasa de accidentes, bajas laborales, y menores gastos de reparación. Además, permite ofrecer un mejor servicio al cliente, informándole, en tiempo real, de la posición y estado de su carga.

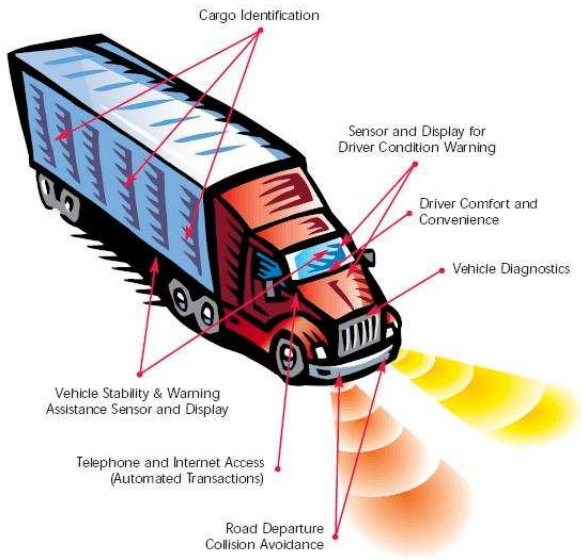


Figura 10-28. Camión con los sistemas implementados

Un **conductor de un autobús** tiene más fuentes de distracción que las habituales en un turismo: tiene que cumplir unos horarios de paso por las paradas, preocuparse por sus clientes, recoger viajeros en paradas durante el trayecto. El estacionamiento en la parada debe ser lo suficientemente preciso para facilitar la subida y bajada de los viajeros, teniendo en cuenta que este requerimiento se hace más fuerte en el caso de minusválidos que usan plataformas para subir. Ocasionalmente, los conductores se encargan de cobrar el precio del viaje, y llevar en mente cuántos viajeros suben y bajan en cada parada. Además, para transporte escolar, deben vigilar el estado de los niños. Por otro lado, la empresa de transporte puede conocer en todo momento la posición de su flota, con lo que puede ofrecer información, en tiempo real, de la hora prevista para la llegada y el retraso, en caso de que exista, sobre la hora prevista. Como puede verse, los sistemas de ayuda a la conducción pueden facilitar mucho estas tareas.

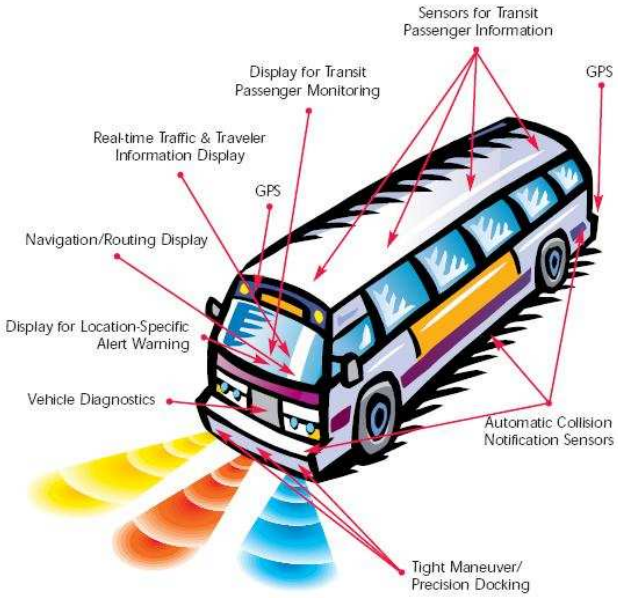


Figura 10-29. Vehículo de transporte público con los sistemas instalados

Por último, los dispositivos de ayuda a la conducción también son aplicables a todo tipo de **maquinaria**. Para la circulación en lugares de trabajo, se podrían evitar accidentes de atropellos de otros trabajadores a pie, colisiones con otra maquinaria, o con obstáculos en el lugar de trabajo. A menudo deben realizar maniobras muy precisas, en espacios reducidos, y con suficiente rapidez, que podrían ser ayudadas. Si las condiciones de visibilidad no son óptimas, como ocurre en minería, debido al polvo, el sistema complementa la visión del conductor.

Por otro lado, si estos vehículos también circulan por carretera, todos los sistemas aplicables a vehículos pesados de transporte también son aplicables a maquinaria pesada.

Figura 10-30. Aplicación de estos sistemas a maquinaria pesada

10.12 Conclusión

La reducción de la siniestralidad en nuestras carreteras es uno de los objetivos que nuestra sociedad tiene como prioritarios. Pero hemos visto que se puede luchar contra este problema desde diferentes puntos de vista. Como ingenieros de carreteras, nuestra principal aportación será la mejora en el diseño de las infraestructuras. Pero en este capítulo hemos visto cómo existen mejoras en el diseño de los vehículos que también están orientadas a la seguridad. Los problemas relacionados con la falta de visibilidad en intersecciones pueden ser evitados con mejores carreteras, pero también con mejores vehículos.

Se han presentado en este capítulo los dispositivos de ayuda a la conducción, que consisten en sistemas auxiliares, de tipo electrónico, capaces de detectar los peligros que surgen en la carretera, y que alertan al conductor en caso necesario, o bien toman ellos automáticamente la decisión.

En el futuro podríamos asistir a un revolucionario cambio en la conducción, según el cual el conductor se convierte en supervisor del funcionamiento del vehículo, totalmente automático. Esto reduciría drásticamente los accidentes, al eliminar el factor humano, que, como se presenta en este documento, es el responsable del 70% de los accidentes mortales.

11 Características de los vehículos

11.1 Introducción

En el desarrollo y aplicación del modelo que se pretende conseguir, un **dato básico** del mismo serán las características de los vehículos. En concreto, hay dos familias de datos que resultan necesarios:

- las dimensiones de los diferentes vehículos tipo a considerar; y
- la capacidad de giro de los vehículos largos y articulados.

11.2 Dimensiones

11.2.1 Turismos

Un conjunto de variables básicas de cualquier modelo sobre circulación son las **dimensiones de los vehículos a considerar**. Sobre este tema, reseñaremos aquí las conclusiones del estudio de González y García (2002).

Se trata de un proyecto de investigación realizado en la Universidad Politécnica de Valencia, España. En este estudio se tomaron medidas de diversos modelos de vehículo, de una manera precisa, para una gran cantidad de modelos. Posteriormente, se tomaron los datos disponibles de ventas de los distintos modelos, en el territorio español. Con esos datos se realizó una **ponderación** de las medidas, con lo que los valores medios ponderados de estas magnitudes, resultan muy significativos del parque automovilístico español actual.

Este texto es interesante por varios motivos. Por un lado, el número de medidas realizado es muy extenso, incluye muchos tipos diferentes de vehículos, de distintos fabricantes, distintos modelos. Por otro, estas medidas se realizan con bastante precisión (cm), sobradamente suficiente para los objetivos propuestos. Dichas medidas están ponderadas teniendo en cuenta la distribución real de vehículos en circulación. Por último, los datos son muy recientes, y siguen siendo válidos. Una única limitación presenta esta investigación, y es que los vehículos analizados son todos de tipo ligero o medio, ninguno pesado.

En la realidad, las diferentes variables estudiadas adoptan valores en un cierto rango. Esta **variabilidad** puede ser incluida en el modelo o no, dependiendo del tipo de modelo adoptado. Existen **modelos deterministas**, en los que se adoptan valores representativos de cada una de las variables involucradas. En ellos se estudia una situación extrema, altamente improbable, en la que concurren valores extremos de todas las variables. Si en esa situación extrema, el diseño es correcto, podemos plantear que nuestro diseño será válido para un amplio rango de situaciones posibles, y garantizar con bajo riesgo la seguridad de las decisiones adoptadas.

Una variante de estos modelos deterministas, **el método de los estados límite**, trata de recoger más situaciones posibles, sin quedarse con una única situación de cálculo. A priori, rechaza la posibilidad de escoger entre la situación más desfavorable y prueba diferentes escenarios posibles, tomando diferentes valores extremos para el conjunto de variables. De esta manera se trata de corregir el problema de que es demasiado improbable la concurrencia de los valores extremos en todas y cada una de las variables. Las hipótesis de cálculo estudiadas recogen situaciones razonablemente posibles, en los que cierto número de las variables adopta valores extremos, mientras que otras adoptan valores medios.

Otros **modelos probabilistas**, tienen en cuenta las diferentes distribuciones de probabilidad de las variables, y tratan de encontrar la probabilidad de ocurrencia de diferentes estados críticos. Si la probabilidad de que se dé una situación desfavorable es extremadamente baja, nuestro diseño es seguro y correcto. El problema es que calcular las probabilidades de simultaneidad de los diferentes valores es harto difícil. A menudo las distribuciones estadísticas no se conocen con precisión, ni tampoco la interacción entre las diferentes variables.

Si descartamos la posibilidad de realizar un estudio estadístico completo de la situación, según un modelo probabilista, podemos resumir toda la información recogida en una serie de valores representativos de las diferentes distribuciones. Para cada variable de la que se tienen datos, estudiaremos sus valores medios y sus valores extremos.

Todas las **variables estudiadas** se midieron en centímetros. Son las siguientes:

- largo: distancia entre la parte frontal y parte posterior del vehículo;
- ancho: distancia entre el límite de la carrocería lateral de un lado y la del otro;
- ancho+retrovisores: distancia entre los bordes de las carcasas de los retrovisores laterales;
- batalla: distancia entre los ejes;
- vía delantera: distancia entre los bordes exteriores de las ruedas del eje de tracción;
- vía trasera: distancia entre los bordes exteriores de las ruedas del eje trasero;
- vuelo: distancia desde el eje delantero hasta el borde frontal del vehículo.

Los distintos vehículos analizados se clasificaron en segmentos. A continuación se listan estos **segmentos**, junto con algunos ejemplos de vehículos comerciales correspondientes a cada uno.

- gran berlina: Chrysler Vision, Honda Legend, Mercedes Clase S;
- berlina alta: Audi A6, Toyota Carina, Peugeot 607;
- berlina media: Renault Laguna, Opel Vectra, Ford Mondeo, Citroen Xantia;
- compacto: BMW 300, Ford Focus, Volkswagen Golf;
- coupé: Hyundai Coupe, Toyota Celica, Opel Tigra;
- micro: Renault Twingo, Ford Ka, Fiat Seicento, Seat Arosa;
- monovolumen: Opel Zafira, Renault Space, Seat Alhambra;
- todoterreno: Nissan Terrano, Suzuki Vitara, Jeep Cherokee;
- utilitario: Seat Ibiza, Renault Clio, Opel Corsa, Citroen Saxo, Ford Fiesta.

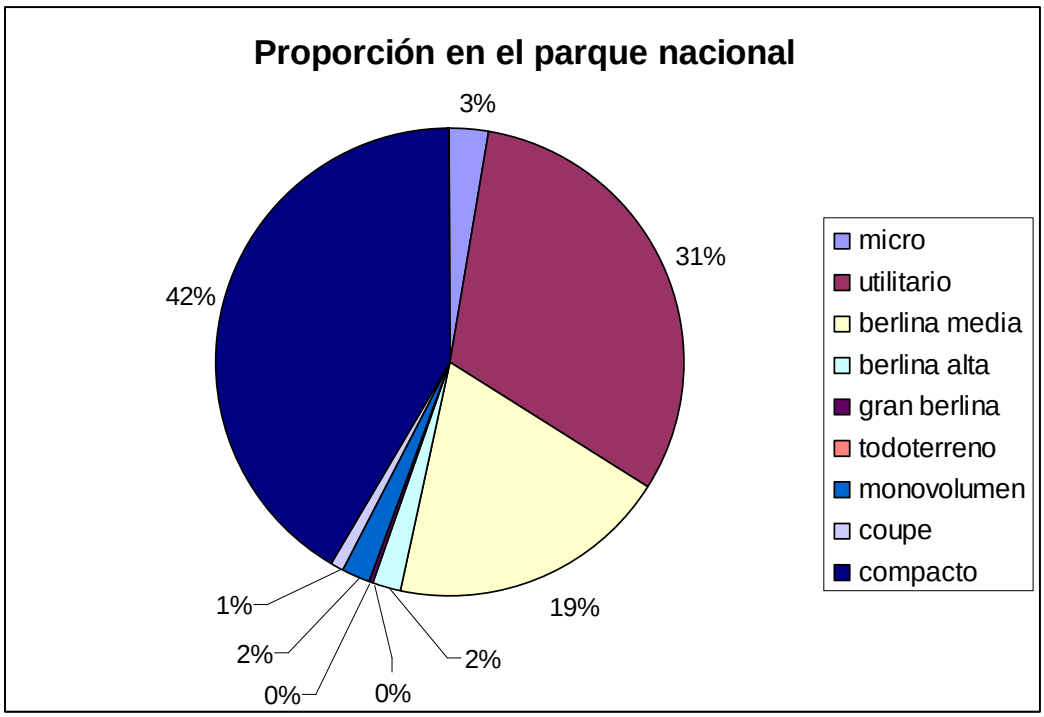


Figura 11-1. Frecuencia de aparición de los distintos segmentos, dentro del parque nacional

Resulta obvio que las dimensiones de un todoterreno no son comparables a las de una berlina. Al analizar la población total resultante podemos observar que no se trata de una distribución normal, o gaussiana. En realidad, podría considerarse la suma de varias distribuciones normales con diferentes medias y desviaciones típicas.

En la Figura 11-2 se muestra el histograma de la variable "largo" para el conjunto de toda la población. Se distinguen varias crestas, correspondientes a las distribuciones de los principales segmentos.

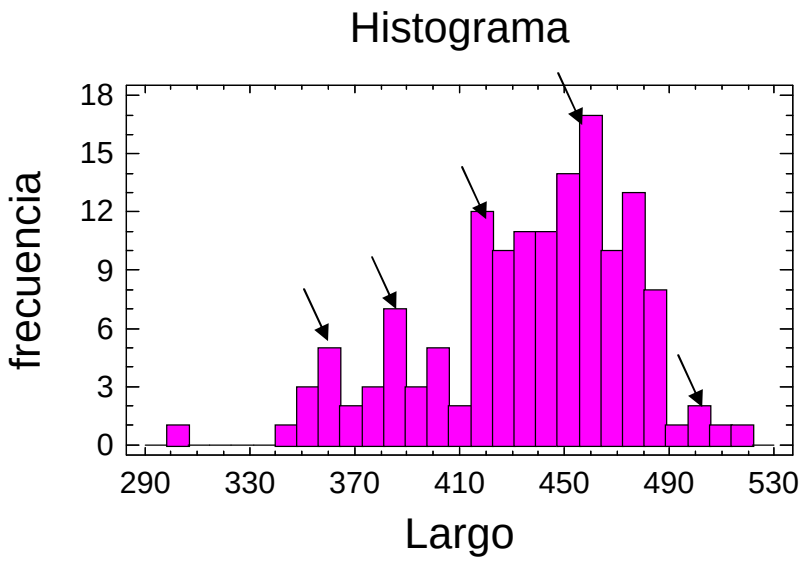


Figura 11-2. Distribución de la variable "largo" en la población total

Para representar en un mismo gráfico sencillo las 9 distribuciones correspondientes a cada uno de los segmentos, hemos de recurrir a un diagrama "caja-bigote". Para cada población, supuestamente normal, se representan sus valores medios (con cruces rojas), los cuartiles, y los valores extremos. En este diagrama que aparece a continuación podemos observar las diferencias notables existentes de un segmento a otro.

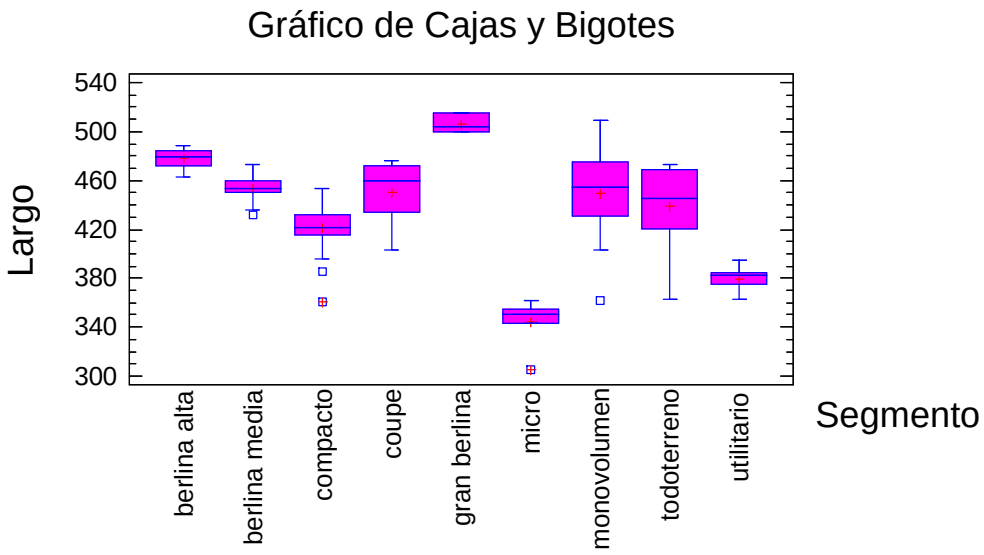


Figura 11-3. Largo de los vehículos, por segmentos

Si dejamos de lado la variabilidad estadística de los datos, dentro de cada segmento, lo que nos interesan son las medias de estos valores. A continuación se muestran las medias de las diferentes variables, ponderadas en función de las ventas, en España, de cada modelo (Tabla 11-1 y Tabla 11-2).

Segmento	Largo	Ancho	Ancho+Ret.	Batalla	Vía del.	Vía tras.	Vuelo
micro	352	162	185	238	139	138	64
utilitario	383	165	188	245	141	139	75
berlina media	456	175	193	267	151	149	93
berlina alta	480	181	199	278	153	154	97
gran berlina	505	186	209	296	156	156	87
todoterreno	473	186	-	276	161	155	-
monovolumen	453	177	203	276	152	154	91
coupe	447	173	194	256	146	145	94
compacto	426	171	197	256	147	145	86

Tabla 11-1. Dimensiones (en cm) medias ponderadas de los vehículos, por segmentos

	Largo	Ancho	Ancho+Ret.	Batalla	Vía del.	Vía tras.	Vuelo
Global	417	170	193	255	146	144	84

Tabla 11-2. Dimensiones (en cm) media ponderada de los vehículos, global

Si, en el modelo de diseño, necesitamos incluir las dimensiones de los vehículos involucrados, habrá que tomar valores del lado de la seguridad. Es decir, que sean superados en pocas ocasiones, y representen una situación suficientemente desfavorable.

En tal caso, si es más desfavorable considerar un vehículo pequeño, adoptaremos las dimensiones de un **vehículo tipo "micro"**. Es la familia de dimensiones más pequeñas, y corresponden al extremo inferior de la población, representando a penas un 1% del total del parque nacional.

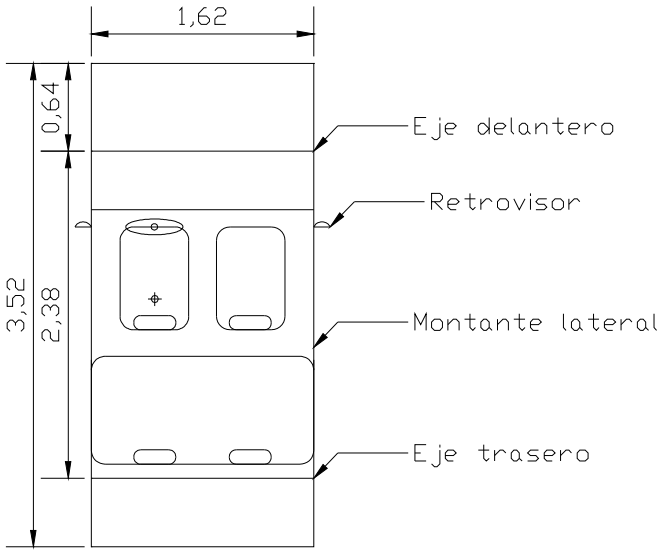


Figura 11-4. Dimensiones de un vehículo tipo "micro"

Si, por el contrario, es más desfavorable considerar un vehículo grande, adoptaremos las dimensiones de un **"gran berlina"**. No obstante, si hay que considerar un vehículo grande, recurriremos a las dimensiones de un camión articulado pesado.

En "A policy on geometric design of highways and streets" (AASHTO) aparecen las dimensiones de los diferentes vehículos tipo que esta organización norteamericana propone.

Para los vehículos tipo turismo (*passenger car vehicle*) el largo es de 5,79m y el ancho de 2,13m. Se trata de un vehículo de grandes dimensiones, pues se considera que esto es más desfavorable en la mayor parte de los casos. No indican dimensiones de vehículos turismo pequeñas.

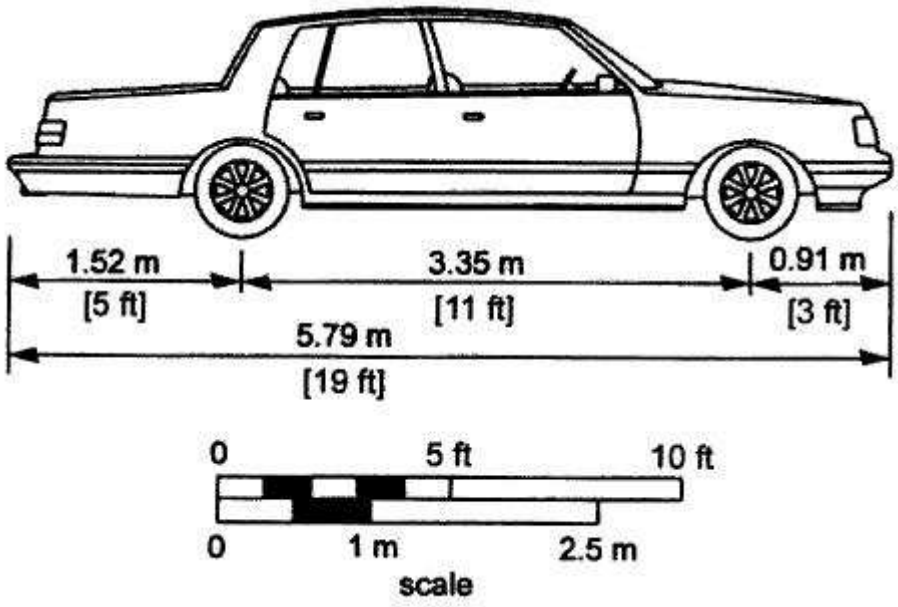


Figura 11-5. AASHTO Passenger car vehicle

11.2.2 Vehículos pesados

Con los datos recopilados por González y García (2002) poseemos suficiente información sobre las dimensiones de los turismos en circulación por España. Pero, además de vehículos ligeros, también circulan por nuestras carreteras otros.

Si en un determinado momento el diseño debe tener en cuenta un vehículo pesado, la situación más desfavorable será considerar un **camión articulado pesado**, de 4 ejes. Este tipo de vehículos representan el extremo superior de la población. Existen vehículos de mayores dimensiones, pero con mucha menos frecuencia de aparición.

El resto de vehículos de dimensiones intermedias presentan un interés menor. Nos referimos a furgonetas, motos, turismos con remolque, autocaravanas, camiones ligeros, autobuses,… Si el diseño es adecuado tanto para turismos pequeños como para grandes camiones, podemos suponer que también lo será para el resto de vehículos de características intermedias.

En "A policy on geometric design of highways and streets" (AASHTO, 2001) aparecen las dimensiones de los diferentes vehículos tipo que esta organización norteamericana propone.

Para los camiones no articulados (*single unit trucks*) el largo propuesto es de 9,15m, y el ancho de 2,44m.

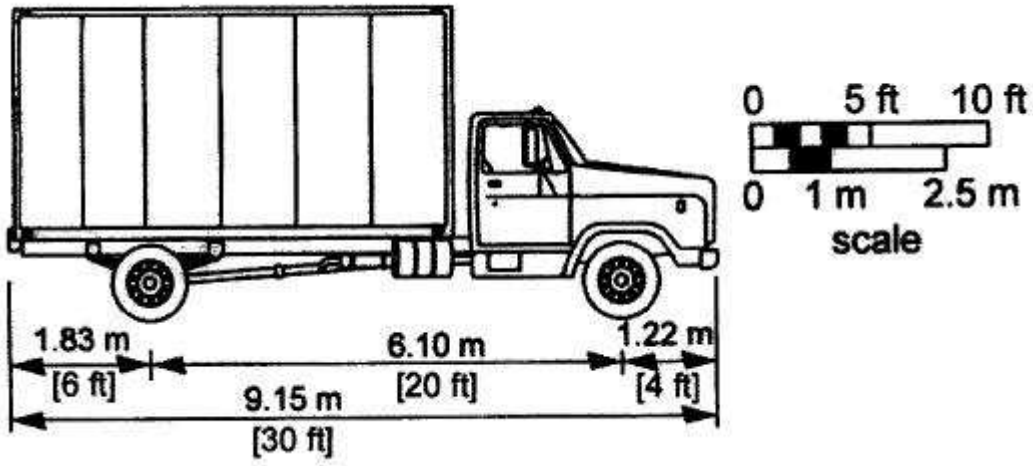
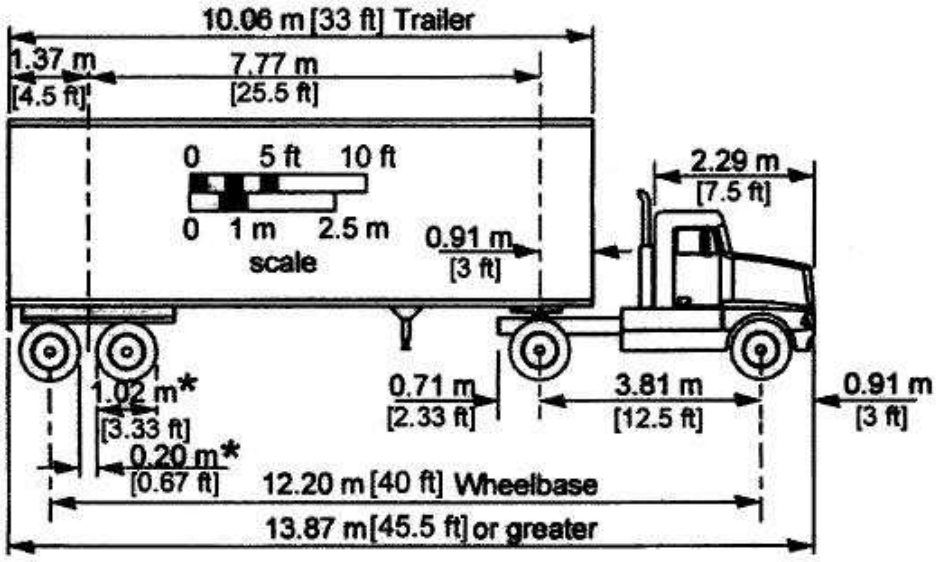


Figura 11-6. AASHTO Single-unit truck

En cuanto a los camiones articulados, considera diversos tipos caracterizados por la distancia entre el eje delantero y el último eje. Deja a elección del proyectista considerar uno u otro, en función del tipo de tráfico que va a circular por la carretera.

En la Figura 11-7 se muestra el camión articulado de 12 m de distancia intereje. La longitud total es de 13,87 m , mientras que el ancho es de 2,44 m .



*** Typical tire size and space between tires applies to all trailers.**

Figura 11-7. AASHTO WB-12 (WB-40)

En la Tabla 11-3 se resumen todos estos valores.

Vehículo tipo	Alto	Ancho	Largo	Vuelo delantero	Vuelo trasero	Inter-eje 1	Inter-eje 2
Passenger car	1.3	2.1	5.8	0.9	1.52	3.4	
Single unit truck	3.4	2.4	9.2	1.2	1.8	6.1	
Inter-city bus 14	3.7	2.6	13.7	1.8	2.6	8.1	1.2
Semi-trailer WB12	4.1	2.4	13.9	0.9	0.8	3.8	8.4
Semi-trailer WB15	4.1	2.6	16.8	0.9	0.6	4.5	10.8
Semi-trailer WB20	4.1	2.6	22.4	1.2	1.4	6.6	13.6
Motor-home	3.7	2.4	9.2	1.2	1.8	6.1	
Farm tractor	3.1	2.6	10.54			3.1	2.7

(*) Dimensiones en metros

Tabla 11-3. Dimensiones de los vehículos tipo propuestas por la AASHTO

11.3 Giro de vehículos largos y articulados

Todos los vehículos, incluso los más pequeños, necesitan de un cierto espacio para girar. El primer limitante es el máximo ángulo de dirección, entendido éste como el ángulo que adoptan las ruedas delanteras respecto al eje del vehículo. Cada modelo presenta un ángulo máximo de giro, que provoca que todos tengan un **radio mínimo de giro**. Este radio es el de la circunferencia más pequeña en la que son capaces de circular.

En segundo lugar, **las ruedas traseras no siguen exactamente la misma trayectoria que las delanteras**. El motivo de este hecho es que sólo las delanteras pueden girar cambiando de dirección, mientras que las traseras están fijas. Como resultado, las ruedas traseras siguen una trayectoria que siempre queda en la parte interior de la curva. Este hecho resulta más patente en los vehículos largos que en los cortos, aunque se da en todos.

Por último, en los **vehículos articulados**, el remolque sigue una trayectoria totalmente diferente a la de la cabeza tractora. En general, la parte trasera del remolque también quedará en la parte interior de las curvas.

Diversos investigadores han estudiado el espacio ocupado por los vehículos al realizar las maniobras de giro. Las conclusiones obtenidas se aplican al diseño de intersecciones y al cálculo de **sobreanchos en curvas**.

Fambro y otros (1989) evalúan, mediante un modelo informático, el ancho de calzada necesario para que 5 tipos de vehículos articulados maniobren en estas intersecciones, variando también el ángulo de giro. Así, se trazaron trayectorias para estos vehículos girando ángulos de 60, 75, 90, 105 y 120 grados. Asimismo, se realizaron giros de 180 grados para averiguar el radio mínimo para esta maniobra. Los vehículos utilizados se designaron como WB-50 (semi-trailer) de 55 pies de longitud (16,76 m), WB-55 (semi-trailer largo) de 60 pies (18,29 m), WB-70 (semi-trailer-trailer) de 75 pies (22,86 m), WB-105 (semi-trailer-trailer largo) de 110 pies (33,53 m) y WB-100 (semi-trailer-trailer-trailer) de 105 pies (32 m).

Aparecen los términos *offtracking* (retranqueo parcial, entre ruedas del mismo lado) y *swept path* (retranqueo total) que aparecen definidos con claridad en la Figura 11-8. El término *offtracking* (retranqueo parcial) se define como la distancia entre las trayectorias de las ruedas delantera y trasera cuando el vehículo trata de realizar un giro. *Swept path* (retranqueo total) se define como la distancia anterior más el ancho del automóvil.

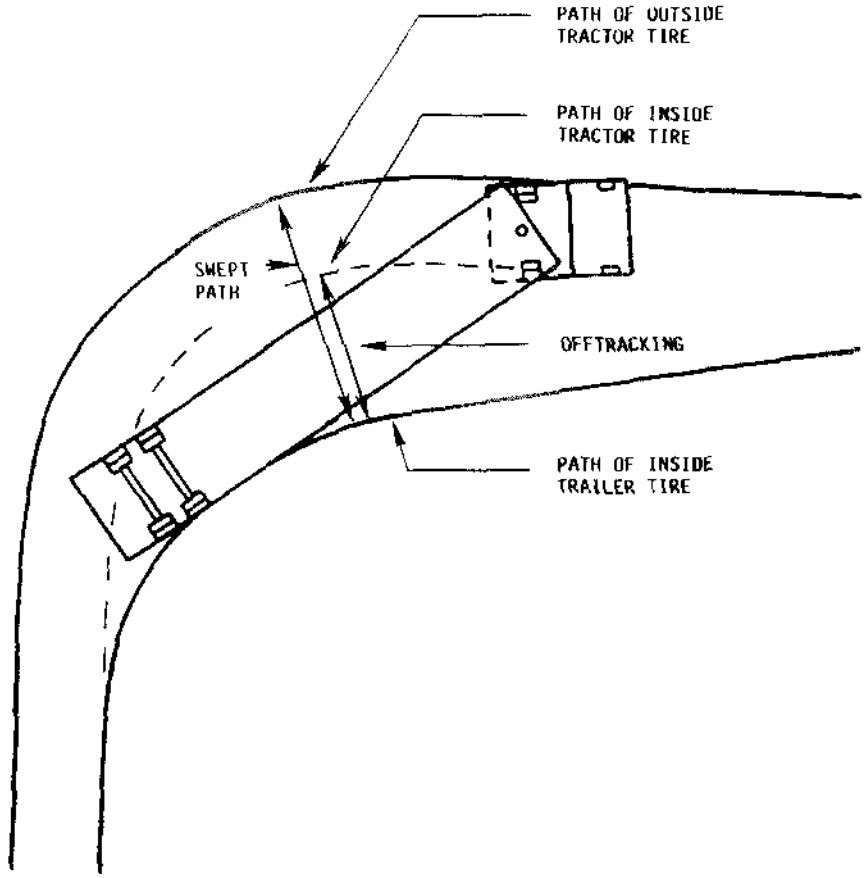


Figura 11-8. Esquema del significado de los términos "offtracking" y "swept path"

De este modo, el modelo informático desarrollado traza sobre papel las trayectorias de las ruedas delantera exterior y trasera interior en cada vehículo a fin de comprobar las dimensiones de la zona que necesita cada automóvil para realizar un giro con el ángulo indicado. En la Figura 11-9 se puede contemplar el ejemplo de la trayectoria que realizaría el modelo WB-105 (las medidas de esta figura están en pies).

Solo con contemplar la Figura 11-9, el lector puede percibir las enormes superficies requeridas para que vehículos de estas dimensiones realicen giros en intersecciones oblicuas; de este modo queda testimonio de la entidad del problema abordado.

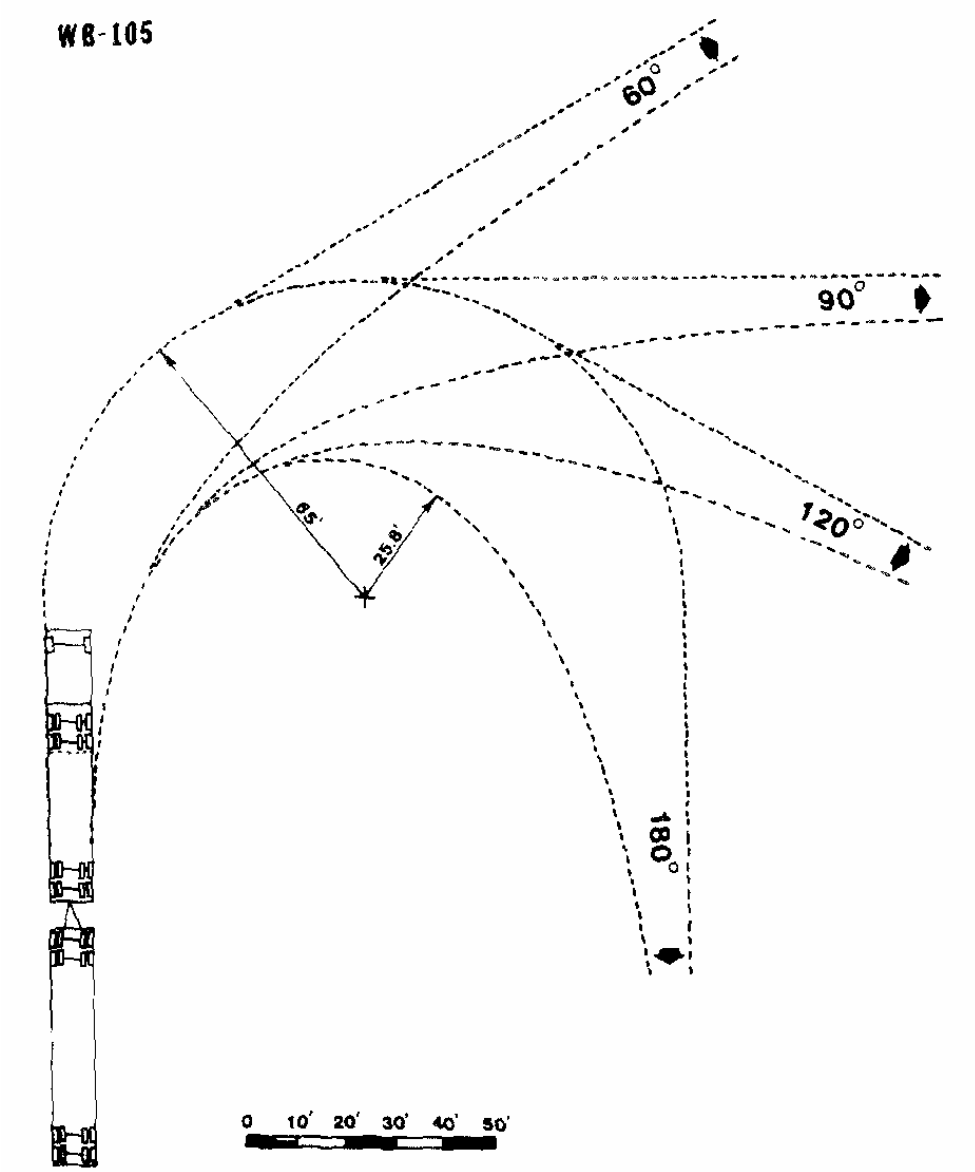


Figura 11-9. Trayectoria del modelo WB-105 en el estudio de Fambro y otros

Esquemas similares a éste pueden encontrarse en "California Design Manual" publicado por el California Department of Transport (2004) (Figura 11-10).

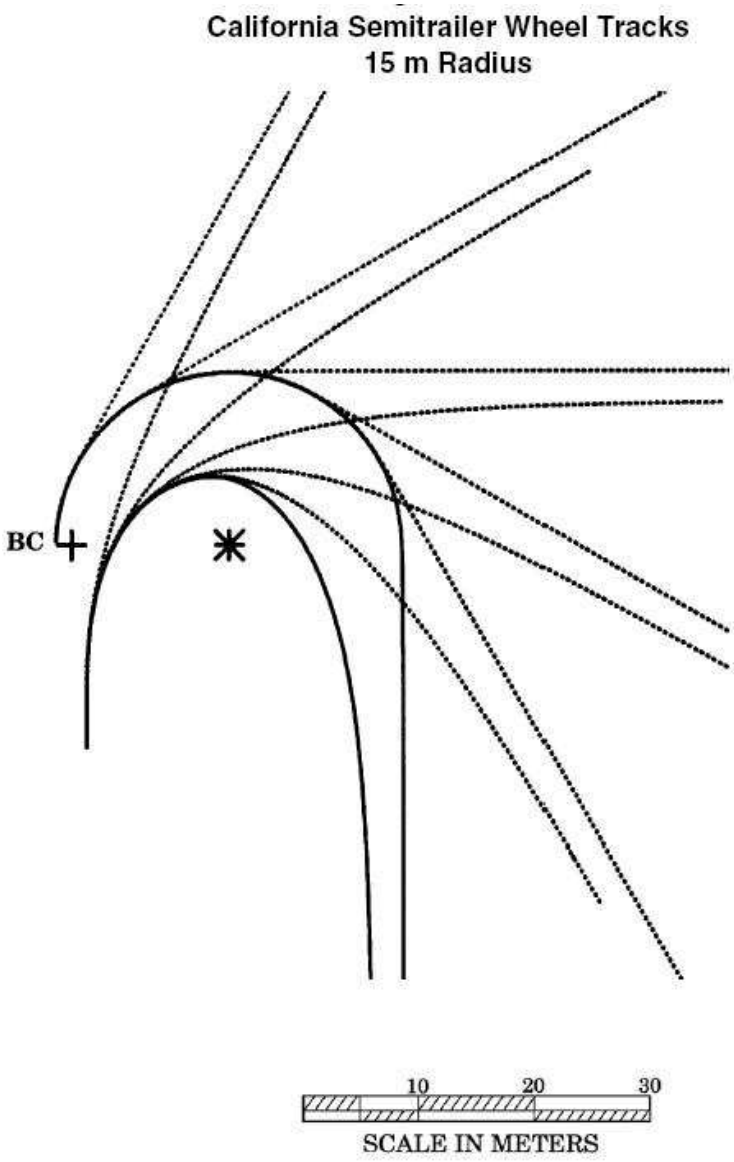


Figura 11-10. Trazada de un camión girando. California DOT.

12 Accidentalidad

12.1 Introducción

La **seguridad** de una infraestructura queda definida como sigue: "el número de accidentes, por tipo, que han ocurrido (o pueden ocurrir) en un ámbito espacial determinado, durante un periodo de tiempo determinado". Podemos hablar de seguridad observada, si tenemos datos históricos de la misma; o bien de seguridad estimada, si se trata de predicciones basadas en ciertos modelos.

Es conveniente definir **accidente**, pues es un término incluido en la definición de seguridad. Accidente es el suceso en el que un vehículo que circula por la vía sufre una colisión, contra otro vehículo, o contra otro objeto cualquiera, situado sobre la vía o en sus inmediaciones.

Los accidentes pueden clasificarse según su **gravedad**. Ésta puede determinarse en función del número de víctimas mortales, pero también del número de heridos y de la cuantía de daños materiales.

También señalaremos que seguridad siempre se refiere a un ámbito espacial concreto, usualmente un tramo de la red viaria. Y que también se refiere a un ámbito temporal específico: la seguridad es una variable temporal, dinámica, que evoluciona con el tiempo.

El principal objetivo de un adecuado diseño de carreteras es realizar carreteras que sean seguras. En este apartado se hace una revisión de la literatura relacionada con accidentes en intersecciones, accidentes ocasionados por falta de visibilidad, por edad avanzada del conductor, etc.

Cuando se presentan las **estadísticas de accidentes de circulación** de los países occidentales, suelen considerarse como satisfactorias, dada la continua disminución de las cifras desde principios de los años setenta. La Figura 12-1 procede de "Traffic Safety Facts 2002" (National Highway Traffic Safety Administration, 2004), mientras que la Figura 12-2 procede de "Plan Estratégico de Seguridad Vial 2005-2008" (Dirección General de Tráfico, 2004).

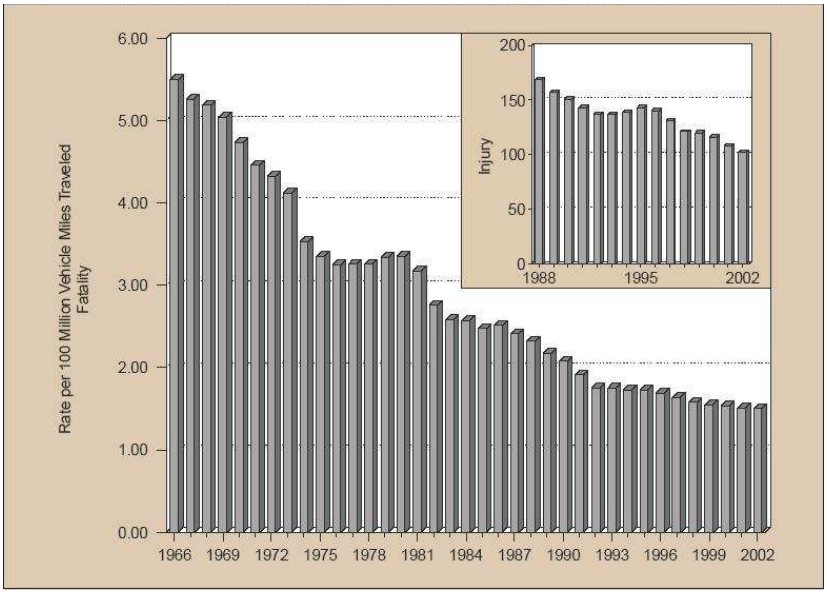
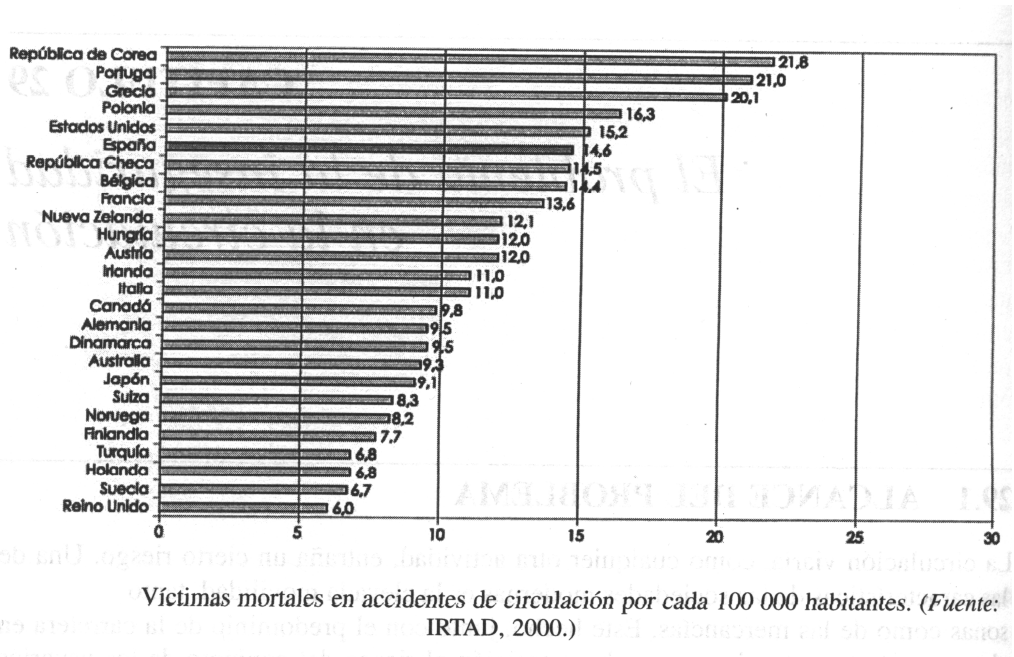


Figura 12-1. Accidentes en EEUU en los últimos años

Figura 12-2. Accidentes en España, en los últimos años

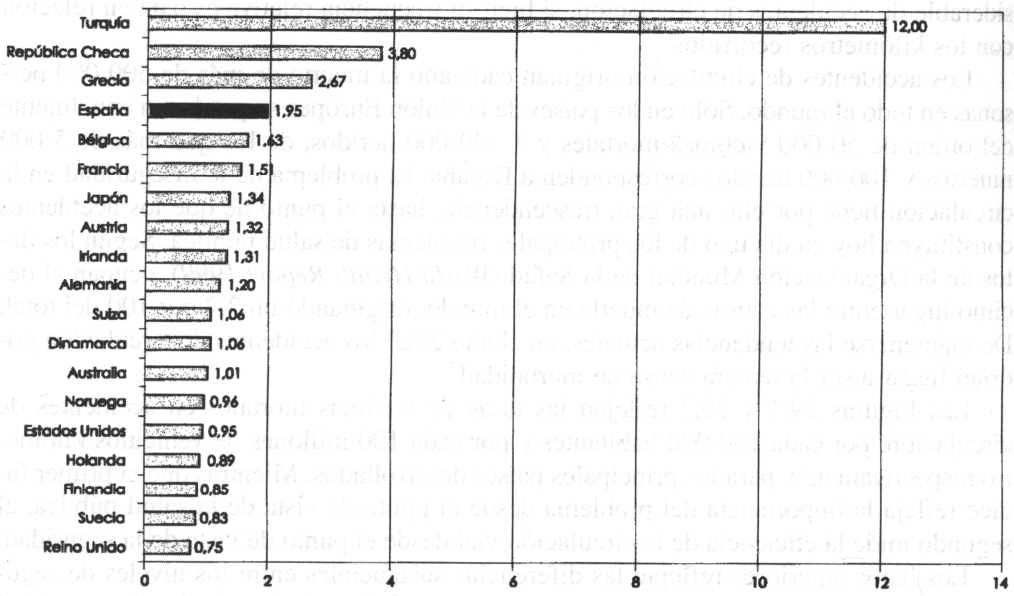
Sin embargo, el nivel de seguridad de la circulación por carretera **en Europa** es todavía desfavorable comparado con el que existe en países como Estados Unidos y Australia, y extremadamente desfavorable comparado con lo que en otros medios de transporte se considera aceptable. El transporte por avión o por ferrocarril tiene unas cifras de accidentalidad del orden de 30 a 200 veces menores que las de la carretera. En otros aspectos de la vida cotidiana, como por ejemplo la seguridad laboral, los accidentes domésticos, los niveles de seguridad por unidad de tiempo son quizá varios miles de veces superior a los de la carretera.

España se mantiene en los peores puestos en las estadísticas de accidentalidad en carretera, según se muestra en la Figura 12-3 y Figura 12-4. Se producen 14.6 víctimas mortales por cada 100.000 habitantes (datos del año 2000), así como 1.95 víctimas mortales por cada 10^8 vehículos-km.



Víctimas mortales en accidentes de circulación por cada 100 000 habitantes. (*Fuente:* IRTAD, 2000.)

Figura 12-3. Tasas de accidentes en diversos países desarrollados



Víctimas mortales en accidentes de circulación por cada 10^8 veh.·km.
(*Fuente:* IRTAD, 2000.)

Figura 12-4. Tasas de accidentes en diversos países desarrollados (2)

12.2 Técnicas para afrontar el problema

Todo esto nos lleva a considerar que **la seguridad en la carretera debería ser un objetivo primordial** para todos los agentes con poder de decisión sobre el tema: políticos, legisladores, policía, proyectistas, constructores, fabricantes de vehículos, incluso para el propio conductor y usuario de la vía.

Investigaciones recientes permiten llegar a la conclusión de que el 95% de los accidentes en carretera tienen su causa fundamentalmente en **el error humano**. Esto podría hacernos pensar que sólo podemos reducir la siniestralidad en la carretera reduciendo los errores de los usuarios. Esto no es del todo cierto, en la medida que el diseño de la vía y las condiciones con las que se encuentra el conductor son las que han inducido el comportamiento del mismo. Por tanto, un diseño adecuado de la vía y sus elementos, puede ayudar a evitar errores humanos.

Otra forma para enfocar la seguridad vial en el diseño de carreteras es conseguir vías que **minimizan los efectos de un accidente**. En caso de producirse, el accidente ocurre bajo ciertas condiciones que lo hacen menos grave, reduciéndose el número de víctimas mortales. Algunas técnicas para conseguirlo pueden ser reducir la velocidad, la ausencia de terraplenes y de obstáculos contra los que impactar.

En España, el "Plan Estratégico de Seguridad Vial 2005-2008" (DGT, 2004) contempla la mejora de infraestructuras como un aspecto clave en la reducción de la siniestralidad de nuestras carreteras.

Figura 12-5. Estrategias a seguir según la Dirección General de Tráfico

Hay una gran variedad de tipos de intersecciones, con muy diversas intensidades de tráfico. También están involucrados una gran variedad de tipos de conductores, de diferentes condiciones, distintos tipos vehículos. Por ello se trata de **un problema complejo**, al que hay que aplicarle herramientas estadísticas. Para enfrentarse al problema de la accidentalidad en la carretera es necesario crear grupos multidisciplinares (Neuman y otros, 2003). En ellos, especialistas de todas las ramas involucradas en seguridad vial pueden intercambiar ideas y adquirir una **visión global del problema**. En esos grupos de expertos tendrían cabida ingenieros, políticos, abogados, jueces, educadores, y todo tipo de personas relacionadas con la seguridad. Si se ataca al problema desde diversos frentes, se pueden conseguir mejores resultados.

El texto citado incluye un capítulo sobre la **metodología** a seguir en un grupo de trabajo multidisciplinar:

- Identificar el problema.
- Reclutar a especialistas adecuados.
- Establecer objetivos en reducción de accidentes.
- Identificar restricciones, condiciones en el problema.
- Desarrollar diferentes alternativas para alcanzar los objetivos.
- Evaluar las diferentes alternativas.
- Desarrollar un plan de acción, con una programación específica de actuaciones y señalando los agentes que intervendrán en cada actuación.
- Obtener fondos para el presupuesto.
- Llevar a cabo el plan.
- Evaluar los resultados y proponer modificaciones, volviendo al primer punto.

Este proceso es un proceso iterativo. Llegado al final del mismo, es necesario volver al principio para desarrollar un nuevo plan de actuación que dé respuesta a nuevos problemas surgidos.

En este texto se van analizando aspectos que se pueden mejorar relativos a la seguridad, y qué alternativas se pueden escoger para ello, en los distintos ámbitos involucrados. Es una guía muy extensa y completa con una descripción de **actuaciones concretas para reducir la siniestralidad en las carreteras**. Proponen:

- Reducir la gravedad de los conflictos mediante un adecuado diseño de las intersecciones: una adecuada canalización y una realineación para evitar la oblicuidad.
- Aumentar la visibilidad en las intersecciones.
- Aumentar la cantidad y tamaño de los huecos disponibles en el tráfico principal, para que los vehículos sin preferencia puedan realizar sus maniobras.
- Ayudar a los conductores a evaluar adecuadamente los huecos disponibles. Eso puede conseguirse de varias maneras: instalando dispositivos que señalen la existencia de un hueco adecuado; colocar marcas en la vía, que ayuden a calcular las distancias; reajustar el tiempo de los ciclos de semáforos cercanos, para crear huecos en los que realizar la maniobra.
- Mejorar la percepción lejana de la intersección, para que los conductores la detecten mucho antes de llegar a ella.
- Elegir adecuadamente la regulación del tráfico en la vía.
- Conseguir un mayor respeto por las señales y regulaciones aplicables en las intersecciones, por parte de los conductores que las utilizan.
- Disminuir el número de accesos a las vías cerca de las intersecciones, para no confundir a los conductores.
- Reducir las velocidades de operación de la intersección.
- Encauzar adecuadamente las trayectorias en las intersecciones.

Como vemos, **la oblicuidad de las intersecciones** es tratada como un factor que afecta a la seguridad vial. La solución propuesta es realinear la intersección. Eso plantea como problemas el gran coste económico que esto supone, un largo plazo de tiempo para conseguir llevarlo a cabo. Pero también que la curva de entrada que se realice no sea tan cerrada que, al solucionar el problema de la oblicuidad, generemos el problema de una gran curvatura de entrada. Así mismo, el realineamiento, afecta gravemente a las propiedades cercanas. Por otro lado, los costes de mejorar la canalización, instalar ramales exclusivos de giro, es bajo.

En el punto relacionado con proporcionar medios para evaluar adecuadamente el hueco en una intersección, introduce una solución novedosa. Hay un trabajo realizado por el Missouri DOT, en el que colocan una luz roja para avisar, al vehículo de la vía secundaria, de la presencia de un vehículo con prioridad. Se trata de un elemento sencillo, fácil de entender, y cuya advertencia influye notablemente sobre el tráfico.

La otra alternativa para facilitar la evaluación de los huecos, es colocar marcas viales sobre la vía principal. Si el conductor que pretende cruzar o incorporarse está aleccionado sobre su uso, puede saber que no debe realizar la maniobra si el vehículo contrario está más cerca de esa línea. Este método es experimental, y no está probado su uso.

Es importante alertar al conductor de que se está acercando a una intersección complicada. Para ello se colocan señales de alta visibilidad en el tramo de aproximación, se advierte de la peligrosidad de la intersección, se mejora la iluminación de la misma ...

Otra manera de avisar al conductor es instalar isletas elevadas y visibles como parte de la canalización de la vía. Comentan que esta técnica es especialmente efectiva con intersecciones oblicuas. Aunque no hay consenso sobre el grado de efectividad de la misma.

Una estrategia a seguir para que los conductores mayores sean conscientes de la intersección es instalar señales más grandes y bien visibles. E indicar con cierta antelación las direcciones a tomar en la intersección, para llegar a cada uno de los destinos. Las personas mayores tienen problemas de visibilidad y necesitan más tiempo para procesar la información y decidir qué camino tomar.

12.3 Factores implicados

Los accidentes de circulación que se producen tienen usualmente múltiples causas que se relacionan entre sí. Existen **multitud de factores** que influyen en la probabilidad de ocurrencia de un accidente, así como en su gravedad final. Analizar el peso relativo de cada uno de estos factores permite identificar cuáles son los aspectos en los que cualquier mejora puede tener más efectividad. Sobre todo, interesa comparar el diseño y características de la vía, con respecto al resto de factores. Los factores relacionados con la carretera son el campo de actuación del ingeniero, es su parcela de responsabilidad. Hemos de valorar en qué medida una mejora de la vía puede llegar a evitar accidentes.

Un estudio llevado a cabo por el Transport Research Laboratory (TRL) británico, en el año 1981, sobre los factores concurrentes en una amplia muestra de accidentes muestra que la causa principal es el **factor humano**. Sin embargo, la mejora en las características de los vehículos, y de la infraestructura pueden contribuir a reducir el riesgo, y en consecuencia, la aparición de accidentes.

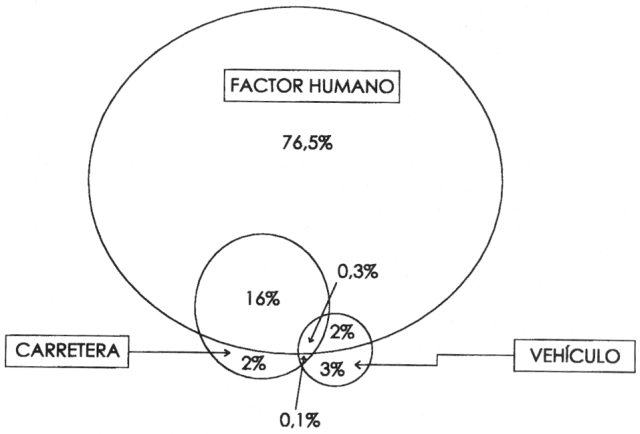


Figura 12-6. Factores concurrentes en los accidentes de circulación

12.3.1 Factor humano

Este es el factor más importante, y sobre el que más esfuerzos se deberían realizar.

Para conducir de una manera segura es preciso tener unas mínimas condiciones físicas y psicológicas, así como unas habilidades específicas. **Las condiciones físicas y psicológicas** no son nada fuera de lo común, y la gran mayoría de las personas están capacitadas para conducir un vehículo, incluso personas con cierto grado de impedimento

o discapacidad. **Las habilidades necesarias** pueden obtenerse en cualquier academia o autoescuela, durante un periodo de aprendizaje relativamente corto, al final del cual, un examinador oficial garantiza que dicho aprendizaje ha sido provechoso.

No obstante, existen ciertos factores que pueden alterar las propias capacidades del conductor, como son el cansancio, la fatiga, la edad, el sueño, el estrés, la ingesta de fármacos, drogas o alcohol,… En estas condiciones, puede disminuirse drásticamente la capacidad de percepción y reacción. Las **distracciones** al volante son la causa de uno de cada tres accidentes de circulación, según estadísticas recogidas en España.

Frente a esta situación, desde el punto de vista de la ingeniería de carreteras, se ha de favorecer la fácil interpretación de la información proporcionada al conductor, favorecer la visibilidad, simplificar las decisiones a tomar, evitar la monotonía en la conducción, mantener la coherencia en el diseño de la vía,… evitando situaciones inesperadas para el conductor.

12.3.2 El vehículo

Muy pocos accidentes tienen su origen en un defecto en el vehículo. En los países desarrollados los vehículos son sometidos a un mantenimiento de manera que los fallos se detectan antes de producirse el accidente.

Sin embargo, el **vehículo puede influir mucho en la gravedad del accidente**, una vez que éste es producido por otra causa. Un buen vehículo puede disponer de diversos **sistemas de seguridad activa y pasiva**, que permiten reducir el riesgo de tener un accidente, o bien minimizar los daños sobre los pasajeros.

En este sentido, podemos citar diversas tecnologías orientadas a facilitar la conducción, evitar accidentes, y reducir la gravedad de los mismos: el cinturón de seguridad, cristales inastillables, barras de refuerzo en el habitáculo, los *air-bag*, sistemas de prevención del bloqueo de ruedas en caso de frenada (ABS), sistemas de ayuda a la estabilidad, sensores de detección de obstáculos, sistemas de alarma en caso de salida de la vía, entre otros.

12.3.3 El entorno

Las condiciones de tráfico condicionan la probabilidad de ocurrencia de un accidente. Estas condiciones engloban multitud de factores dispares entre sí.

Una mayor proporción de vehículos pesados puede aumentar el riesgo de accidentes, así como condiciones malas de visibilidad, lluvia y otros agentes meteorológicos. De la misma manera, el grado de saturación de la vía y la velocidad de operación de los vehículos en un momento determinado, condicionan la frecuencia de accidentes, así como su gravedad.

12.3.4 Las características de la vía

Es indudable que una vía en buen estado y con un adecuado diseño y conservación puede evitar multitud de accidentes y reducir la gravedad de los mismos. A pesar de ello, el estudio del TRB británico anteriormente citado anota que las propiedades de la infraestructura son una causa secundaria en la generación de accidentes.

Las propiedades de la carretera más determinantes en cuanto a seguridad son:

- La **cantidad de intersecciones y enlaces**, así como su fácil interpretación, la reducción de las áreas de conflicto y la separación de movimientos mediante canalizaciones, y su adecuada señalización.

- El **diseño de la sección transversal**, con suficiente anchura para los carriles y arcenes adecuados, así como un tratamiento racional de la mediana.
- Los radios de curvatura adoptados en el **trazado en planta**, los parámetros de los acuerdos para el trazado en alzado, así como la coordinación entre estos trazados, garantizando un diseño suave, de fácil entendimiento para el conductor, sin situaciones inesperadas, que le obliguen a realizar maniobras bruscas.
- El estado del pavimento, y la **conservación** de la infraestructura en general.

12.4 Estadísticas

12.4.1 Tipo de vía

Dentro de las infraestructuras viarias, hay zonas mucho más peligrosas que otras. Podemos diferenciar entre **distintos tipos de carreteras**: autopistas, principales y secundarias. Las autopistas o autovías son aquellas con dos carriles de circulación por sentido (o más), con limitación total de accesos y ausencia de intersecciones a nivel. Canalizan el tráfico nacional e internacional. Las principales son las que sirven de nexo entre ciudades. Tienen un volumen de tráfico considerable, también de tráfico pesado. Casi todas tienen un carril por cada sentido de circulación, con ensanchamientos ocasionales a dos. Las secundarias conectan poblaciones de menor entidad.

Los datos que se incluyen a continuación provienen de "Intersafe - Guía técnica de seguridad para el diseño de carreteras interurbanas" (Federación Europea de Seguridad Vial, 1996). Las autopistas tienen un bajo índice de accidentes debido a su trazado, aunque debido a la velocidad a la que éstos se producen muchos son mortales. Hablamos de unos niveles entre 7 y 15 accidentes con heridos por cada 10^8 vehículos-km, de los cuales, entre 0,5 y 2,0 son mortales.

Las vías principales comprenden el 10 al 20% de la longitud total de las redes nacionales en Europa, pero soportan entre un 15 y un 30% del volumen de tráfico y en ellas se producen entre un 35 y un 50% de los accidentes. Las tasas de accidentalidad se sitúan en estas vías entre 30 y 45 accidentes por 10^8 vehículos-km, con 1,5 a 2,5 mortales.

Las carreteras secundarias soportan sólo el tráfico local. Uno de los puntos más conflictivos lo tendremos en la **intersección** con una vía principal.

Según la DGT (2004), la distribución de accidentes mortales en España, según el tipo de vía, es la siguiente:

Tipo de vía	Accidentes mortales	Porcentaje
Autopista	255	8,40%
Autovía	397	13,08%
Vía rápida	18	0,59%
Carretera convencional	2302	75,82%
Otras	64	2,11%

Tabla 12-1. Accidentes en España, según el tipo de vía

En esta tabla aparecen las vías principales y secundarias englobadas en "carretera convencional", diferenciándose de las vías de 2 o más carriles por sentido.

12.4.2 Las intersecciones respecto del total

Las intersecciones constituyen **una parte pequeña de toda la red viaria, pero con gran peligrosidad**: las intersecciones aglutinan al 50% de los accidentes en áreas urbanas, y al 30% de ellos en áreas rurales, en EEUU, (Kuciemba and Cirillo, 1992).

Los datos correspondientes a la red española son los siguientes (DGT, 2003):

		Accidentes		Muertos		Ind. Gravedad
		Accidents	*%*	*Fatalities*	*%*	*Severity Rate*
TOTAL	***TOTAL***					
Fuera de intersección	***Out of junction***	66.676	66,68%	4.592	85,05%	6,89
En Intersección	***Junction***	33.311	33,32%	807	14,95%	2,42
Total	***Total***	**99.987**	**100,00%**	**5.399**	**100,00%**	**5,40**
CARRETERA	NON BUILT-UP AREA					
Fuera de intersección	Out of junction	38.994	39,00%	3.973	73,59%	10,19
En Intersección	***Junction***	8.573	8,57%	507	9,39%	5,91
Total	***Total***	**47.567**	**47,57%**	**4.480**	**82,98%**	**9,42**
ZONA URBANA	***BUILT-UP AREA***					
Fuera de intersección	***Out of junction***	27.682	27,69%	619	11,47%	2,24
En Intersección	***Junction***	24.738	24,74%	300	5,56%	1,21
Total	***Total***	**52.420**	**52,43%**	**919**	**17,02%**	**1,75**

Ind. Gravedad = Nº de Muertos / 100 Accidentes. *Severity Rate = Nº of Fatalities / 100 Accidents.*

Figura 12-7. Accidentes en España, según características de la vía

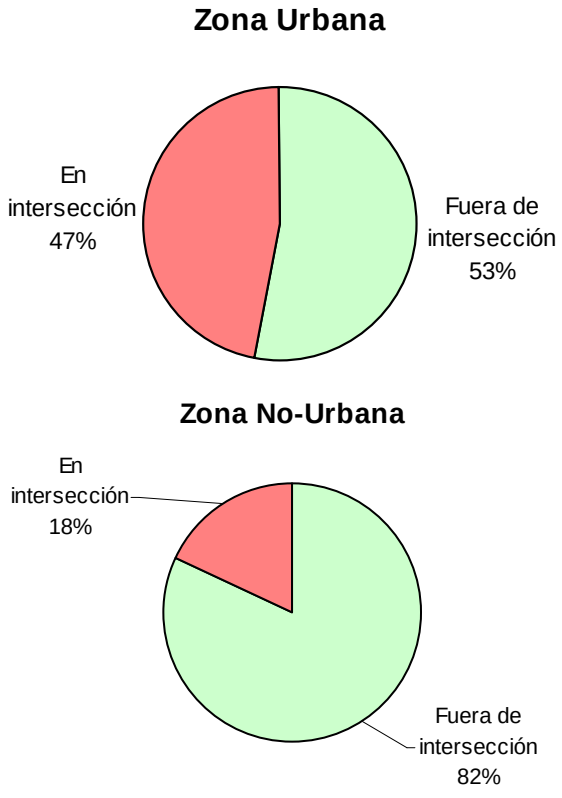


Figura 12-8. Proporción de accidentes producidos en intersecciones

El hecho de que las intersecciones sean tan peligrosas no es raro, puesto que en ellas se concentran gran cantidad de movimientos en conflicto y se generan muchas situaciones peligrosas.

Un estudio reciente (Bauer y Harwood, 1996) encontró que una intersección no semaforizada en un área rural de California tiene una media de 1,5 accidentes al año. En el lado opuesto, una intersección del mismo tipo en un área urbana, tiene una tasa de 2,5 accidentes al año. En contraste, las intersecciones urbanas semaforizadas tienen una media de 4,6 accidentes al año. En cierta manera es esperable pues se instalan semáforos en las intersecciones que tienen más tráfico. Una vía en un área urbana también tendrá más tráfico que una en un área rural. La presencia de más tráfico hace que haya más conflictos y más probabilidades de accidentes. La semaforización también induce un cambio en el tipo de accidentes, pues disminuyen los choques con ángulo y los choques en maniobras de giro, y aumentan los choques por alcance. La gran mayoría de los accidentes en intersecciones no señalizadas son en ángulo, no alcances.

Yinhai Wang y otros (2003) estudian las probabilidades de ocurrencia de accidentes en intersecciones semaforizadas. En Japón, los accidentes en intersecciones son el 60% del total, y el 45% de los accidentes mortales. Las colisiones por alcance (aquellas que se dan entre la parte posterior de un vehículo y la parte frontal de otro) son las más frecuentes de las intersecciones semaforizadas, con un total del 35,4% de los accidentes en intersecciones, y un total del 21,3% del total de accidentes.

El 23% de los accidentes mortales y el 43% de los accidentes totales ocurrieron en una intersección o en sus proximidades, según comentan Wang y Knippling (1993) tras analizar una base de datos de accidentes en EEUU.

12.4.3 Tipo de vehículo

El libro "Traffic Safety Facts 2002" (National Highway Traffic Safety Administration, 2004) es un anuario estadístico de la accidentalidad en EEUU. En él podemos ver que la tasa de accidentes por 100 millones de millas recorridas por vehículo es de:

- 1,68 para turismos,
- 2,11 para camiones ligeros, y
- 2,12 para camiones pesados.

Esto nos indica que los **camiones** tienen unas tasas de accidentalidad por kilómetro recorrido mayores que los turismos. Por tanto, no podemos descartarlos en el análisis de manera injustificada. Tan importante es reducir la accidentalidad en turismos como también en vehículos pesados.

Según la DGT (2004), los accidentes mortales en España, clasificados por el tipo de vehículo se distribuyen así:

Tipo de vehículo	Accidentes mortales	Porcentaje
Bicicleta	66	1,88%
Ciclomotor	143	4,07%
Motocicleta	272	7,75%
Turismo	2176	61,98%
Furgoneta	248	7,06%
Autobús	3	0,09%
Camión	65	1,85%
Vehículo articulado	115	3,28%
Otros vehículos	97	2,76%
Peatones	326	9,29%

Tabla 12-2. Accidentes en España, según el tipo de vehículo

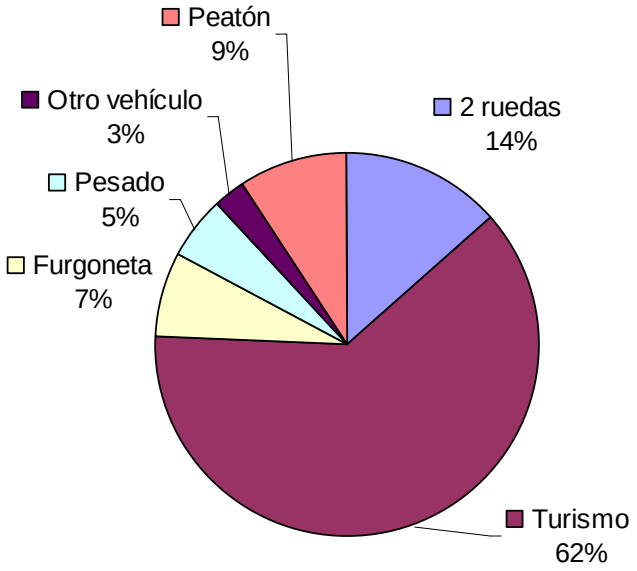


Figura 12-9. Accidentes en España, según el tipo de vehículo

12.4.4 Condiciones ambientales

En EEUU en 2002 (NHTSA, 2004). el número total de accidentes mortales por el día fue de 30978, mientras que por la noche fue de 26498. Por tanto, es igual de prioritario reducir la siniestralidad diurna como la nocturna.

Según la DGT (2003), en España, un 65% de los accidentes tuvo lugar en las horas diurnas, frente al 35% de las nocturnas. Los picos de accidentalidad se producen a las 14 y a las 19 horas, coincidiendo con las puntas de tráfico. Es de señalar que, siendo la noche el periodo del día con menor intensidad de circulación, es el más peligroso, computando el 40% de las víctimas mortales.

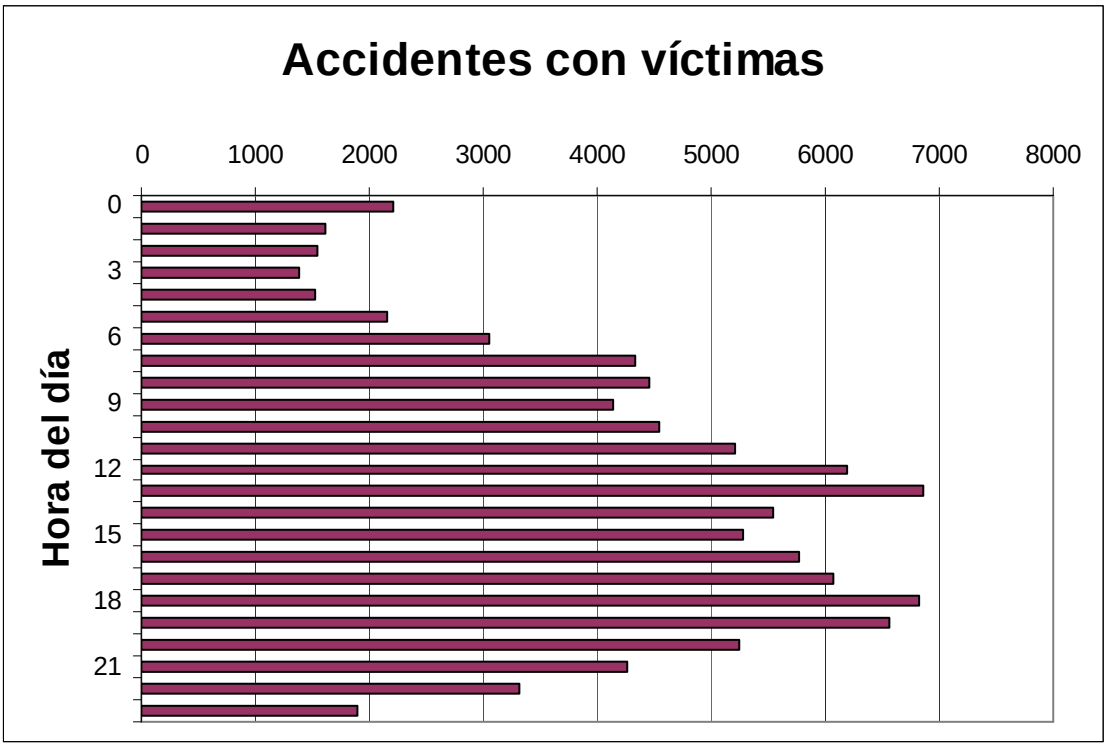


Figura 12-10. Accidentes según la hora, en España en 2003.

Un análisis de la base de datos GES de 1991 (EEUU) nos lleva a señalar que un 43% de los accidentes ocurrieron en condiciones visuales desfavorables. Esto incluye las situaciones no-diurnas (nocturno, nocturno pero iluminado, amanecer y anochecer), y también las de mal tiempo (lluvia, granizo, nieve, niebla). El hecho de que haya muchos accidentes con mala visibilidad no quiere decir que todos ellos estén causados por ésta. Por ejemplo, muchos accidentes nocturnos están relacionados con la presencia de alcohol en la sangre del conductor. Tal y como se muestra más adelante, según la DGT (2003), sólo el 0.07% de los accidentes mortales tuvo como causa principal la meteorología. Y, según la NHTSA (2004), sólo el 2% de los accidentes tuvo su origen en unas malas condiciones de visibilidad.

12.4.5 Tipo de accidente

Según la DGT (2004) el tipo de accidente mortal más frecuente es la colisión entre dos vehículos, seguida de salidas de vía (Figura 12-11 y Tabla 12-3).

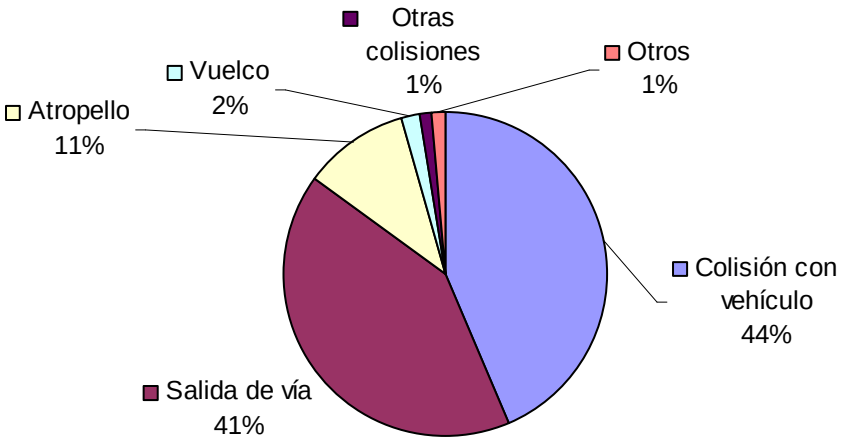


Figura 12-11. Distribución de accidentes mortales en España según el tipo

Tipo de accidente	Accidentes mortales	Porcentaje
Colisión frontal	500	16,47%
Colisión lateral	101	3,22%
Colisión frontolateral	468	15,19%
Colisión por alcance	174	5,63%
Colisión múltiple	81	2,61%
Colisión contra obstáculo	3	0,06%
Otras colisiones	31	0,78%
Salida de vía	1258	40,69%
Atropello de peatón	316	11,39%
Atropello de animal	4	0,38%
Vuelco	62	1,60%
Otro tipo de accidente	38	1,66%

Tabla 12-3. Distribución de accidentes mortales en España según el tipo

En Wang y Knippling (1993) se señala que los accidentes de tipo cambio de carril y de incorporación son cinemáticamente similares y pueden ser tratados conjuntamente. Sumando los accidentes de estos dos tipos, obtienen un 4% del total de accidentes en EEUU, en 1991 (Figura 12-12).

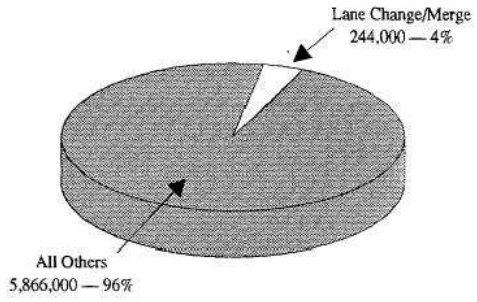


Figura 12-12. Accidentes de cambio de carril-incorporación respecto al total

12.4.6 Causas de los accidentes

Según la DGT (2004), la principal causa de los diferentes accidente mortales registrados fue:

Factores concurrentes	Accidentes mortales	Porcentaje
Velocidad inadecuada	706	23,25%
Maniobra antirreglamentaria	456	15,02%
Invasión izquierda de la calzada	232	7,64%
Inadecuada distancia de seguridad	24	0,79%
Distracción del conductor	816	26,88%
Somnolencia	120	3,95%
Posible enfermedad	24	0,79%
Alcoholemia	37	1,22%
Irrupción de peatón en la calzada	222	7,31%
Irrupción de animal en la calzada	15	0,49%
Avería mecánica	28	0,92%
Condiciones meteorológicas	2	0,07%
Otras causas / Desconocido	354	11,66%

Tabla 12-4. Accidentes mortales en España, según la causa principal

Según la NHTSA (2004) las principales causas de accidente son por fallo en la habilidad de mantenerse en el carril (salidas de carretera), y por exceso de velocidad. Las causas relacionadas con esta investigación serían el fallo a la hora de ceder el paso (inadecuada valoración del hueco existente) y el fallo en obedecer las señales (no respetar la preferencia de paso). Estas causas representan un bajo porcentaje relativo del total.

Por otro lado, podemos observar que los accidentes por mala visibilidad son muy bajos. Esto nos reafirma en la posibilidad de despreciar condiciones de visibilidad adversas como lluvia, nieve, la noche, etc.

Factors	Number	Percent
Failure to keep in proper lane or running off road	18,937	32.8
Driving too fast for conditions or in excess of posted speed limit or racing	12,328	21.3
Failure to yield right of way	4,751	8.2
Inattentive (talking, eating, etc.)	3,731	6.5
Operating vehicle in erratic, reckless, careless, or negligent manner	3,729	6.5
Failure to obey traffic signs, signals, or officer	3,023	5.2
Overcorrecting/oversteering	2,470	4.3
Swerving or avoiding due to wind, slippery surface, vehicle, object, nonmotorist in roadway, etc.	2,150	3.7
Drowsy, asleep, fatigued, ill, or blackout	1,674	2.9
Making improper turn	1,515	2.6
Vision obscured (rain, snow, glare, lights, building, trees, etc.)	1,141	2.0
Driving wrong way on one-way trafficway or on wrong side of road	998	1.7
Other factors	9,988	17.3
None reported	20,013	34.6
Unknown	854	1.5
Total Drivers	57,803	100.0

Note: The sum of the numbers and percentages is greater than total drivers as more than one factor may be present for the same driver.

Tabla 12-5. Factores causantes del accidente

12.5 Accidentes en incorporaciones y cambios de carril

12.5.1 Tipos

En "Lane change/merge crashes problem size assessment and statistical description" (Wang y Knipling, 1994) se estudian las estadísticas disponibles sobre accidentes en cambios de carril e incorporaciones. Cinemáticamente, estos dos tipos de accidentes son muy similares, por lo que resulta acertado tratarlos conjuntamente.

Se pueden distinguir varios tipos de colisiones en este tipo de maniobras. Tenemos el tipo *vehicle striking* (vehículo golpeando), que ocurre cuando el vehículo que realiza la maniobra choca contra el lateral de otro vehículo. Por el contrario, el tipo *vehicle struck* (vehículo golpeado) ocurre cuando el vehículo que realiza la maniobra es golpeado en el lateral por otro vehículo. En ambos casos, la maniobra se ha realizado sin el adecuado hueco. El tipo *sideswipe* es un empujón lateral. Y el tipo *rear-end* es un alcance.

En el gráfico siguiente (Figura 12-13 y Figura 12-14) se describen con precisión la clasificación. Este esquema pertenece a "Development of performance specifications for collision avoidance systems for lane change, merging and backing" (Eberhard y otros, 1995). Como puede verse, hay un cierto consenso en la clasificación propuesta.

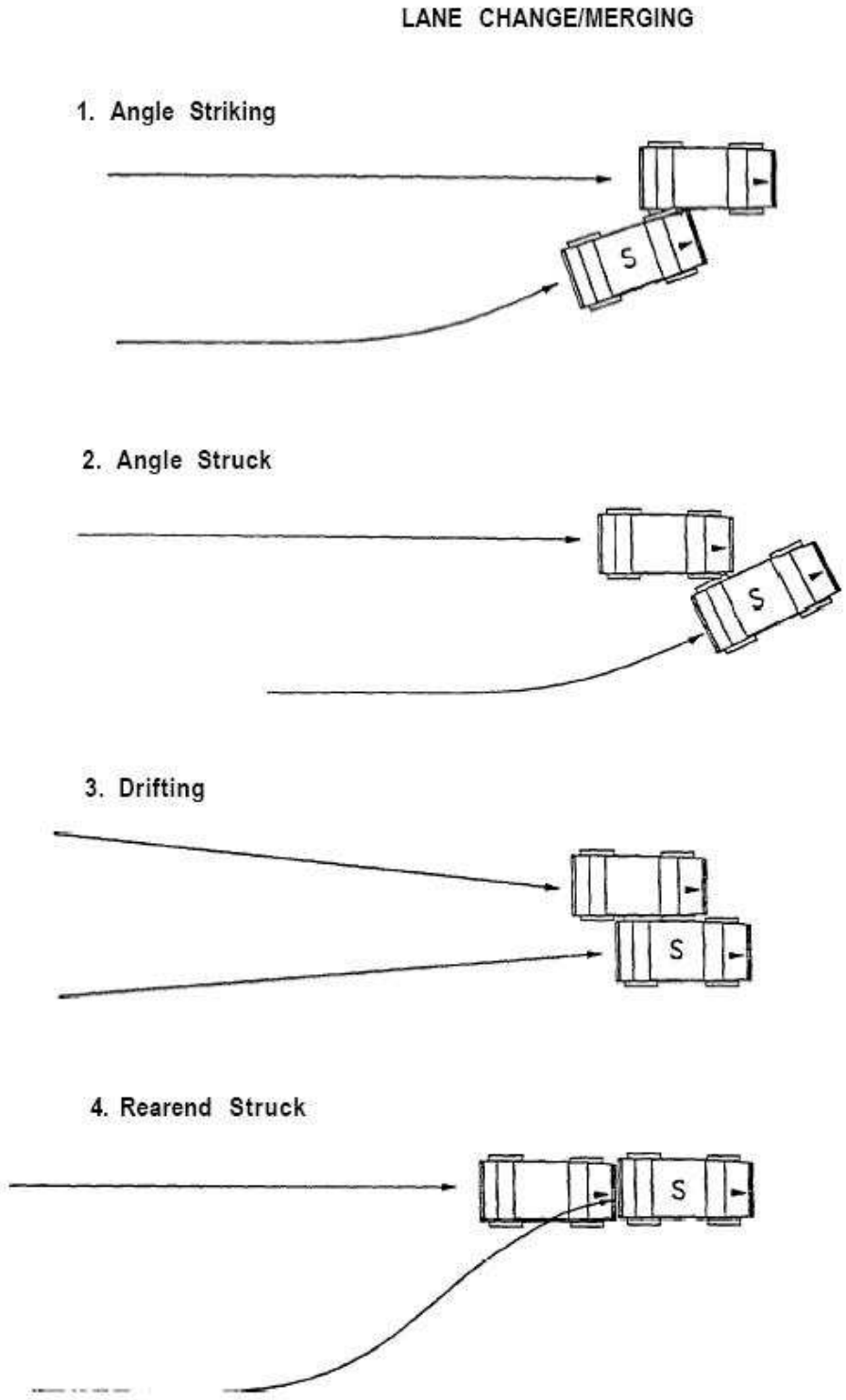


Figura 12-13. Tipos de accidentes en cambio de carril e incorporaciones

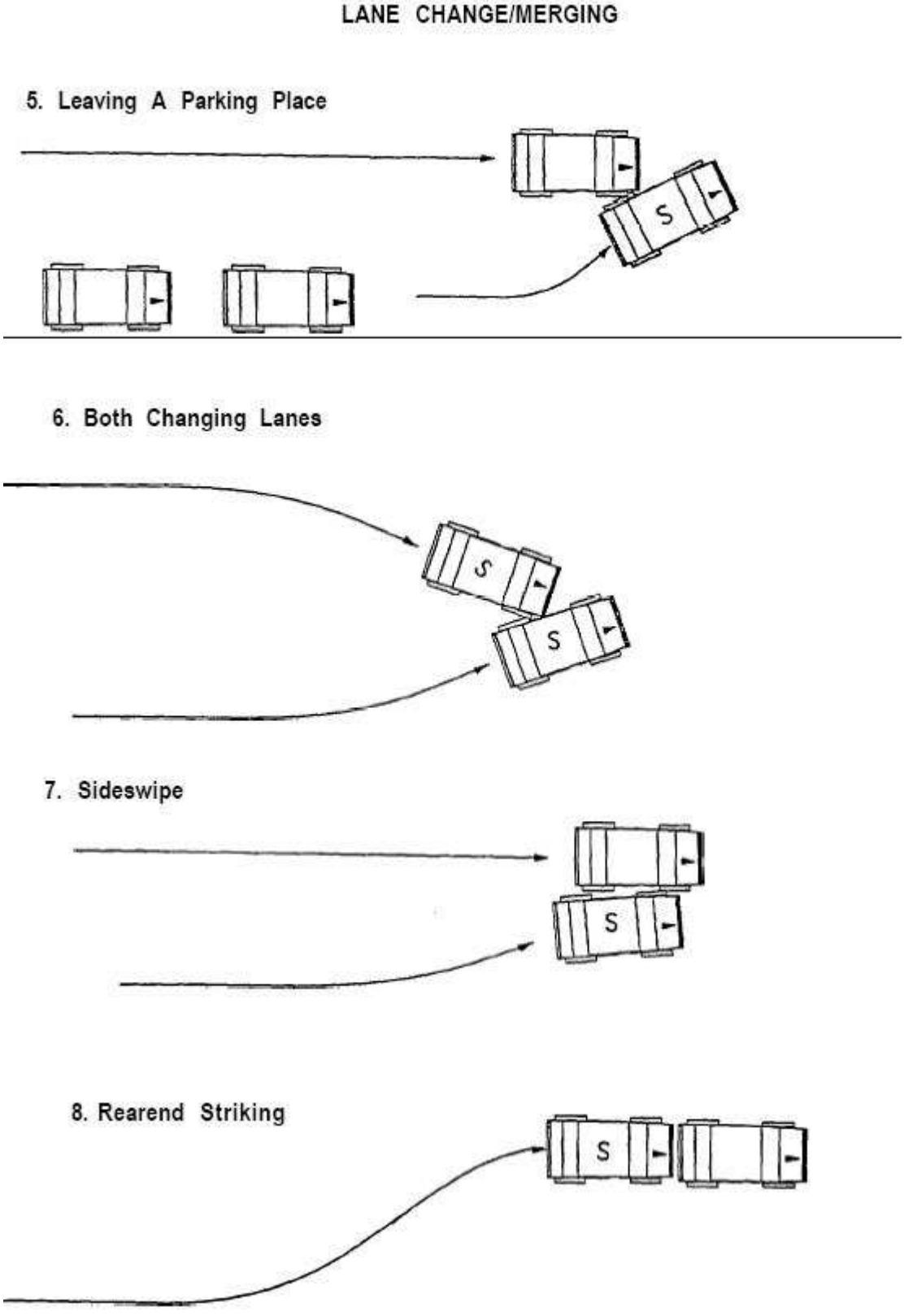


Figura 12-14. Tipos de accidentes en cambio de carril e incorporaciones (continuación)

Chovan y otros (1994) analizan los accidentes durante cambios de carril, diferenciando varios subtipos, como se ve en la figura, donde se diferencia entre accidentes con proximidad (los vehículos circulan cercanos y a velocidades similares) y accidentes con aproximaciones rápidas. Dentro de estos subtipos, aún se diferencian casos en función de la posición longitudinal relativa y las velocidades relativas entre los vehículos.

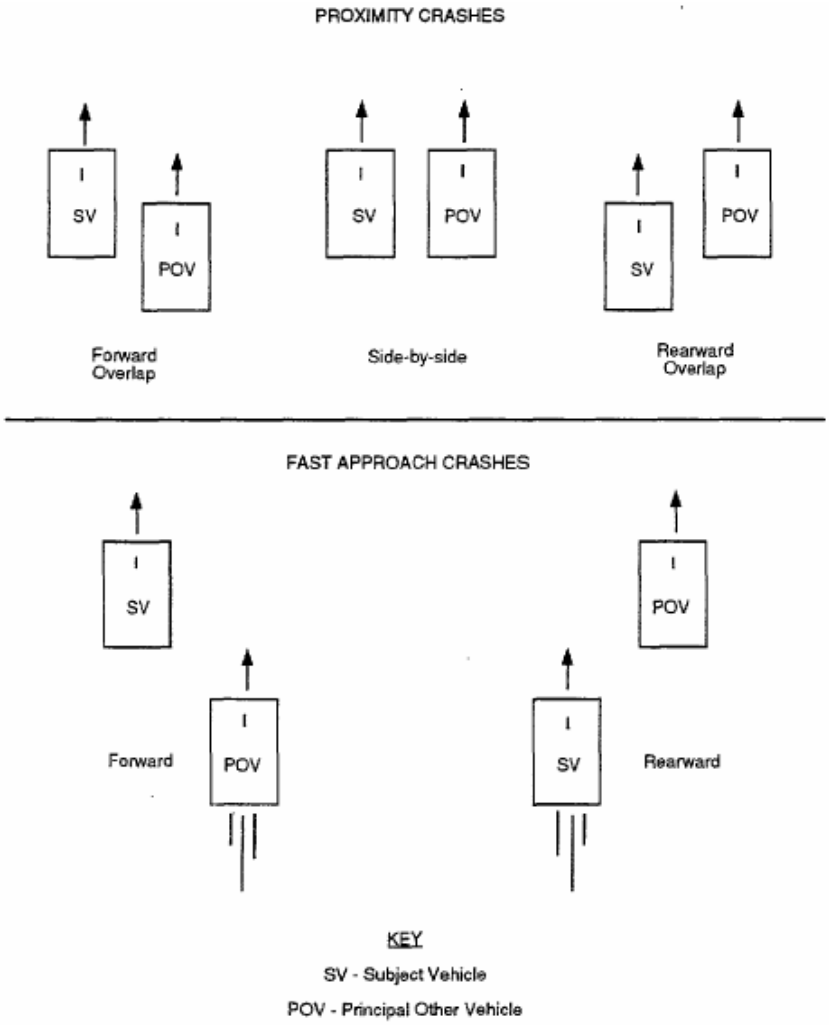


Figura 12-15. Clases de accidentes LCM

En los accidentes con proximidad (*proximity crashes*), el vehículo "no sujeto" (*POV*) puede estar situado antes del accidente en la zona trasera, lateral o delantera del vehículo "sujeto" (*SV*). En los accidentes con aproximaciones rápidas, existe un espacio considerable entre los dos automóviles. En el caso *forward* el *POV* se acerca al *SV* a mayor velocidad cuando este último realiza el cambio de carril, produciéndose el accidente, mientras que en el caso *rearward* el *SV* se acerca rápidamente al *POV* y colisiona con él cuando el *POV* realiza el cambio de carril. En la Figura 12-16 se pueden consultar las proporciones de accidentes según varias fuentes de datos de accidentes de los EEUU.

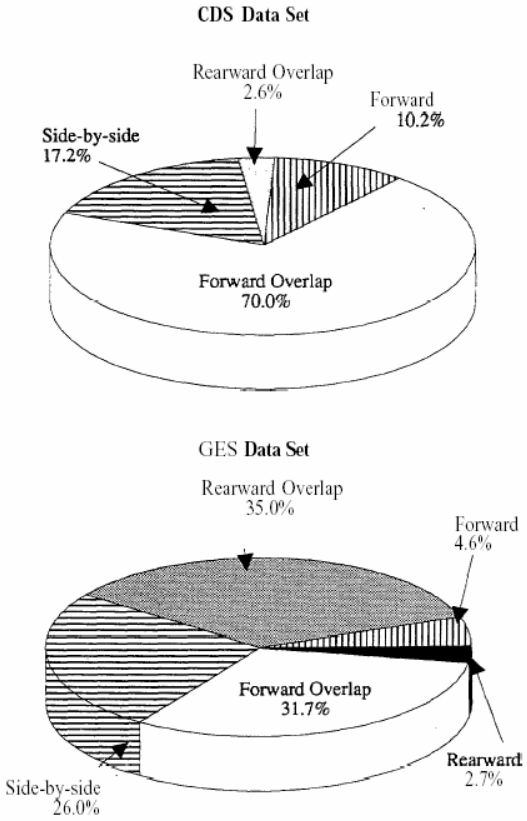


Figura 12-16. Distribución de accidentes durante cambios de carril según subclases

12.5.2 Condiciones

A continuación (Figura 12-17 y Figura 12-18) se relatan algunos datos estadísticos sobre los accidentes de estos tipos de maniobra en EEUU, en 1991, según el texto de Wang y Knipling, 1994; así como el texto de Eberhard y otros (1994).

En cuanto a la **luminosidad**, sólo 13% de los accidentes de este tipo fueron de noche.

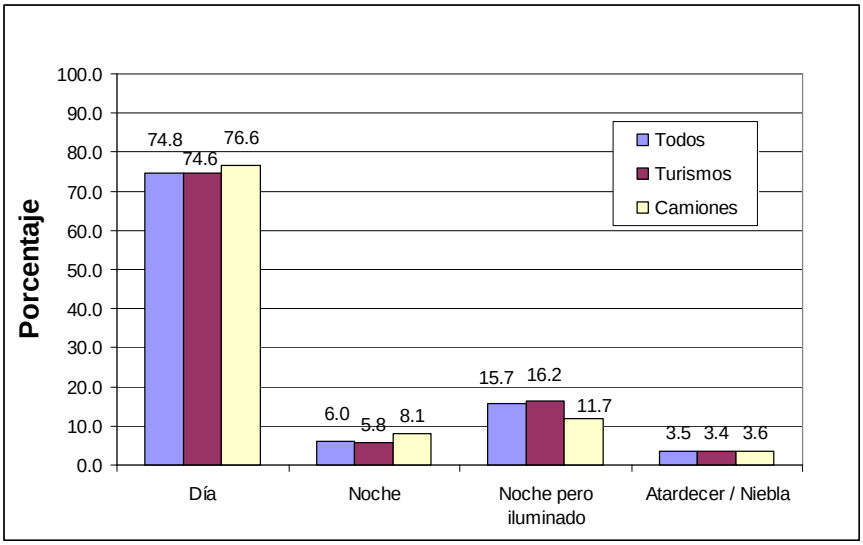


Figura 12-17. Accidentes LCM según su luminosidad y tipo de vehículo

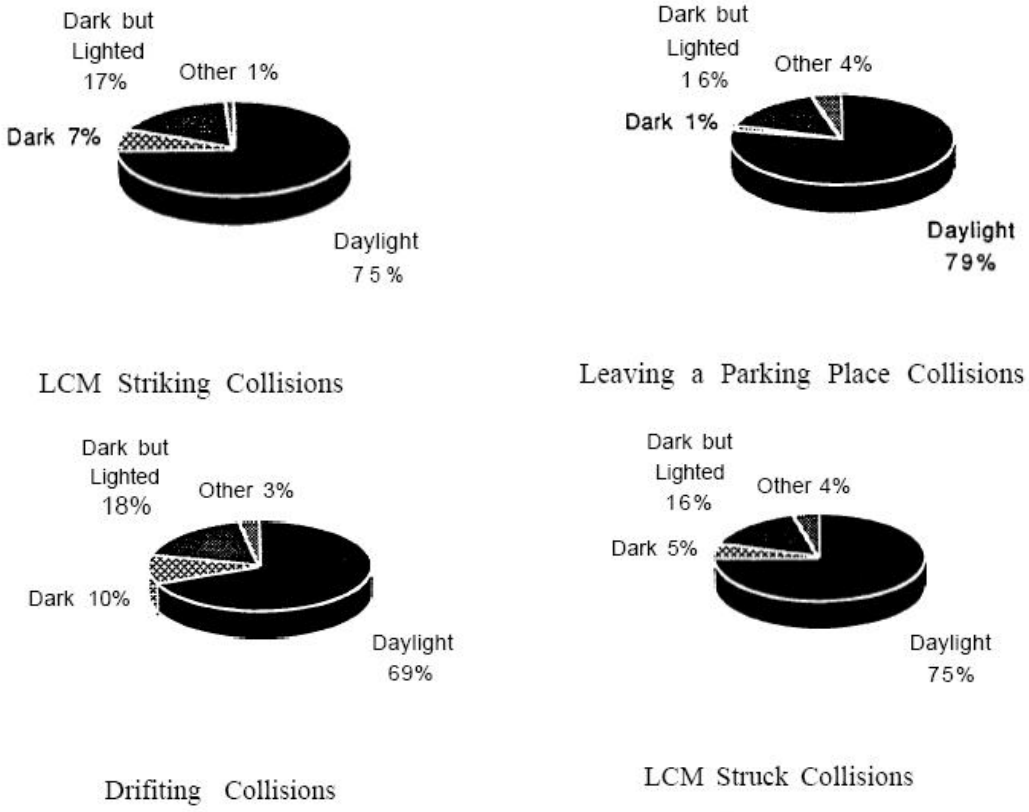
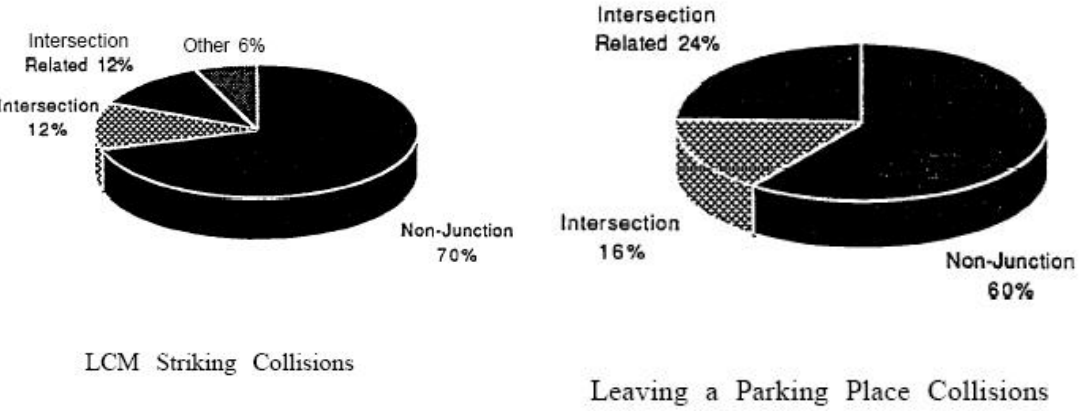


Figura 12-18. Accidentes LCM por luminosidad y tipo de colisión

En cuanto a la ubicación del accidente y su **relación con los nudos**, el 68% de los accidentes de cambio de carril ocurren lejos de las intersecciones. Esto es normal, pues los enlaces suponen una reducida longitud respecto al total de la vía. Sin embargo, si calculamos el ratio accidentes/longitud la conclusión es bien distinta: el 5% de la vía correspondiente a las intersecciones y enlaces acumula el 32% de los accidentes. De esta manera podemos ver cómo las intersecciones son "puntos negros" desde el punto de vista de la seguridad.



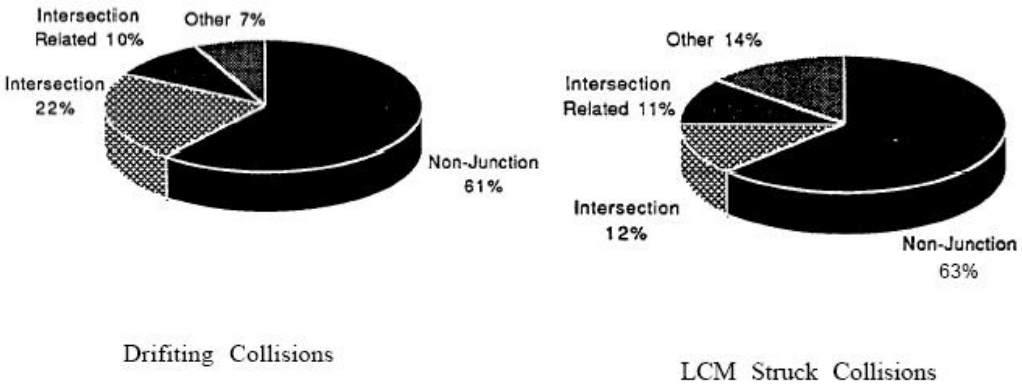


Figura 12-19. Accidentes LCM por cercanía a una intersección y tipo de colisión

En este texto se analiza la **velocidad relativa** de los vehículos antes de chocar. La mayoría (63%) de estos accidentes involucran vehículos con velocidades similares (una diferencia de menos de 5mph), según se muestra en Figura 12-20 Esta fracción mayoritaria corresponde a accidentes lejos de intersecciones. El resto, son con grandes diferencias de velocidad, que es lo que ocurre en una maniobra de incorporación, cerca de las intersecciones.

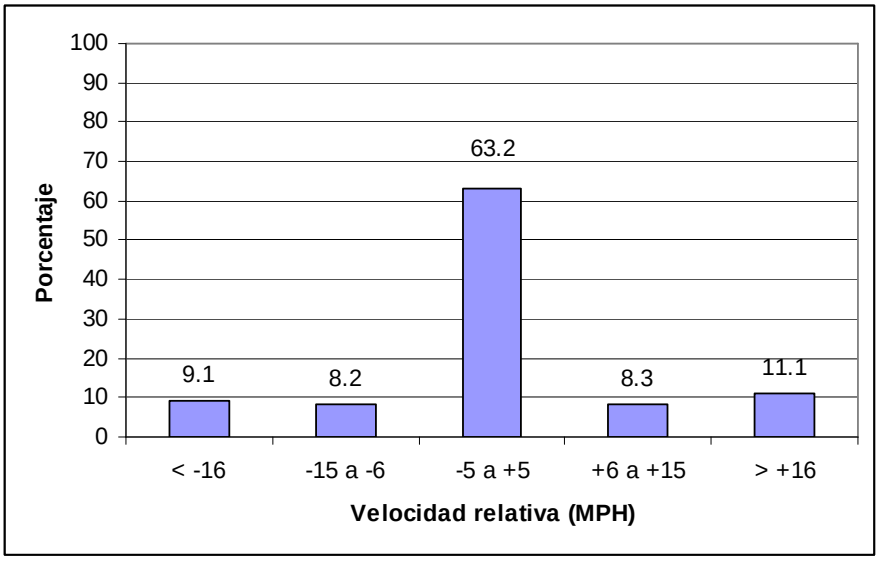


Figura 12-20. Accidentes LCM por velocidad relativa

En cuanto a las **condiciones atmosféricas**, el 15%, con mal tiempo. Es un porcentaje reducido, que nos permite descartar las condiciones de pavimento mojado y visibilidad reducida por motivos atmosféricos. Se trata de un porcentaje reducido, que podrá ser estudiado y analizado por separado.

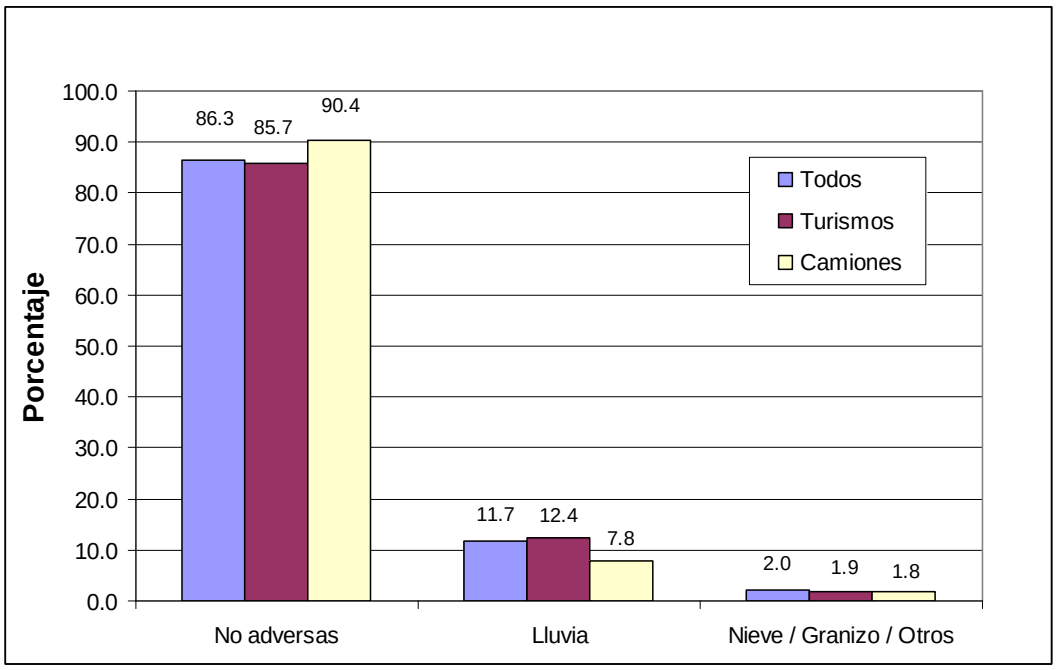


Figura 12-21. Accidentes LCM por condiciones atmosféricas y tipo de vehículo

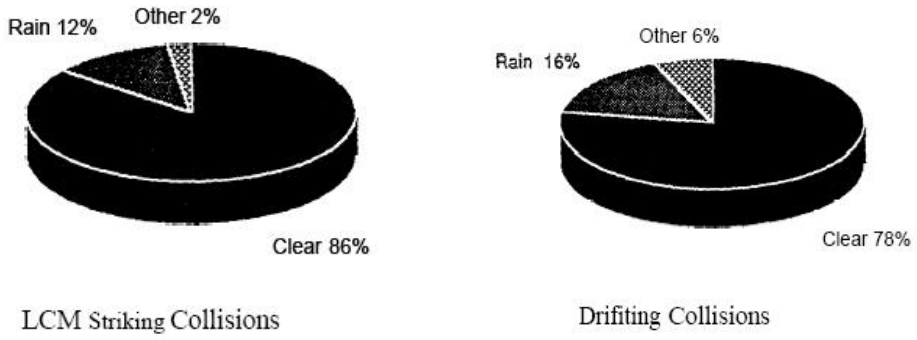


Figura 12-22. Accidentes LCM por condiciones atmosféricas y tipo de colisión

Sobre el **estado del pavimento**, el texto indica que el 82% de los accidentes ocurrió con pavimento seco (Figura 12-23 y Figura 12-24).

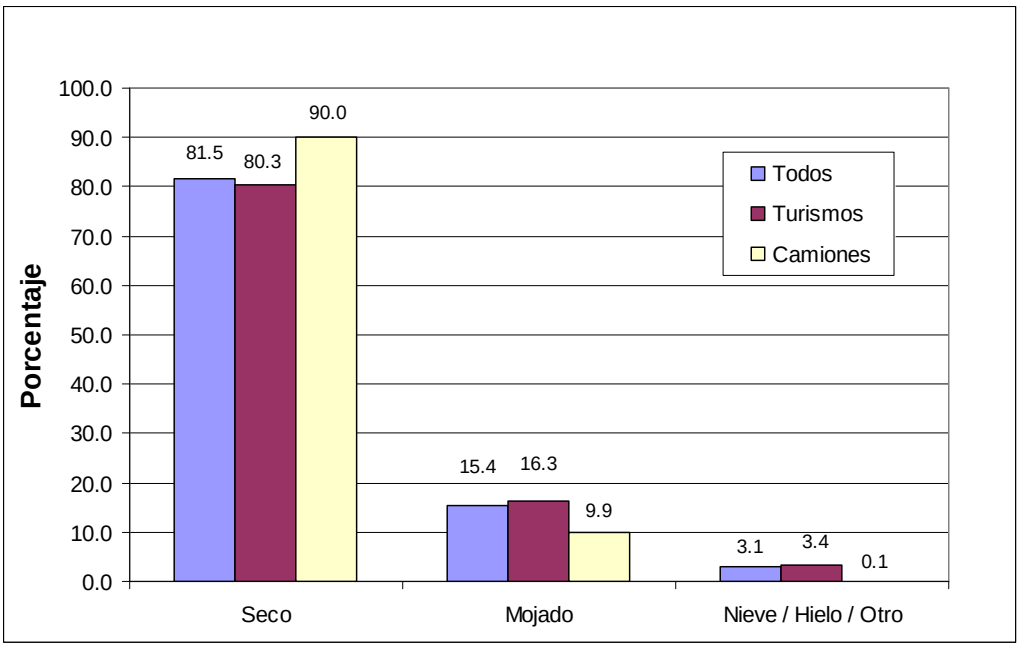


Figura 12-23. Accidentes tipo LCM según el pavimento y tipo de vehículo

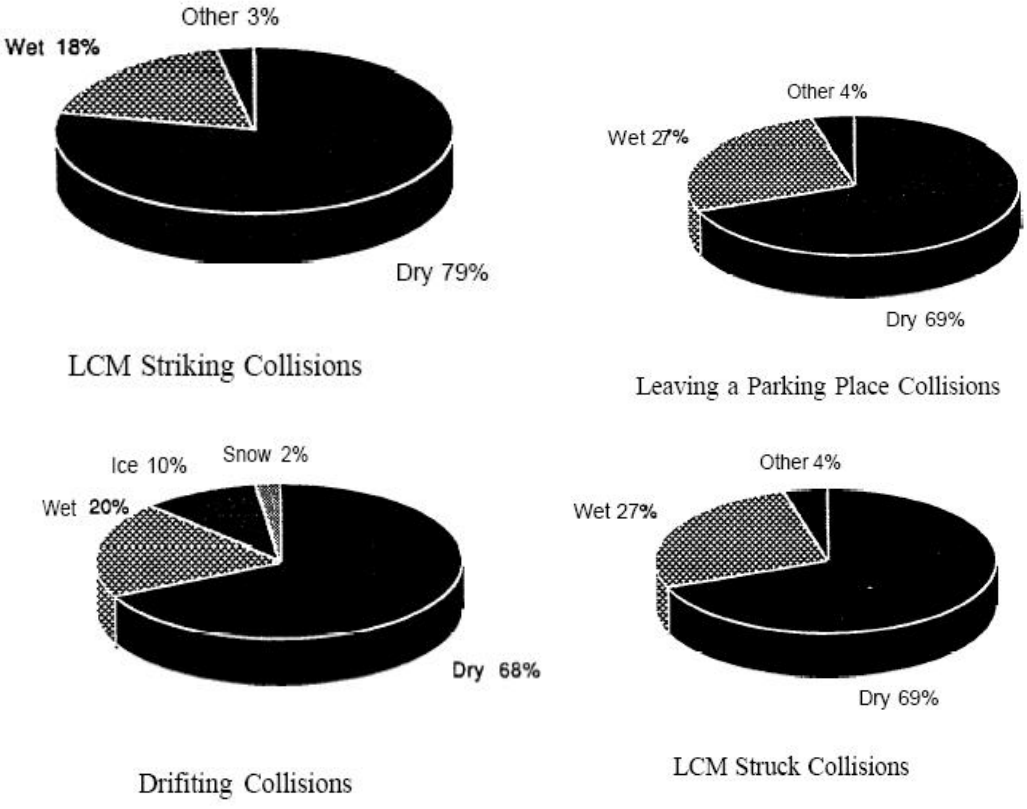


Figura 12-24. Accidentes LCM según el pavimento y tipo de colisión

Respecto a la **edad de los conductores**, el 77% de los accidentes involucra a población menor 45 años. Las personas mayores se ven involucradas en este tipo de accidentes en un porcentaje reducido.

Analizando el **trazado en alzado**, la mayor parte de los accidentes ocurren en zonas llanas. La pendiente no tiene, a simple vista, una influencia notable en la generación de accidentes de cambio de carril o incorporación. Hay pocos accidentes de este tipo en transiciones de trazado en alzado.

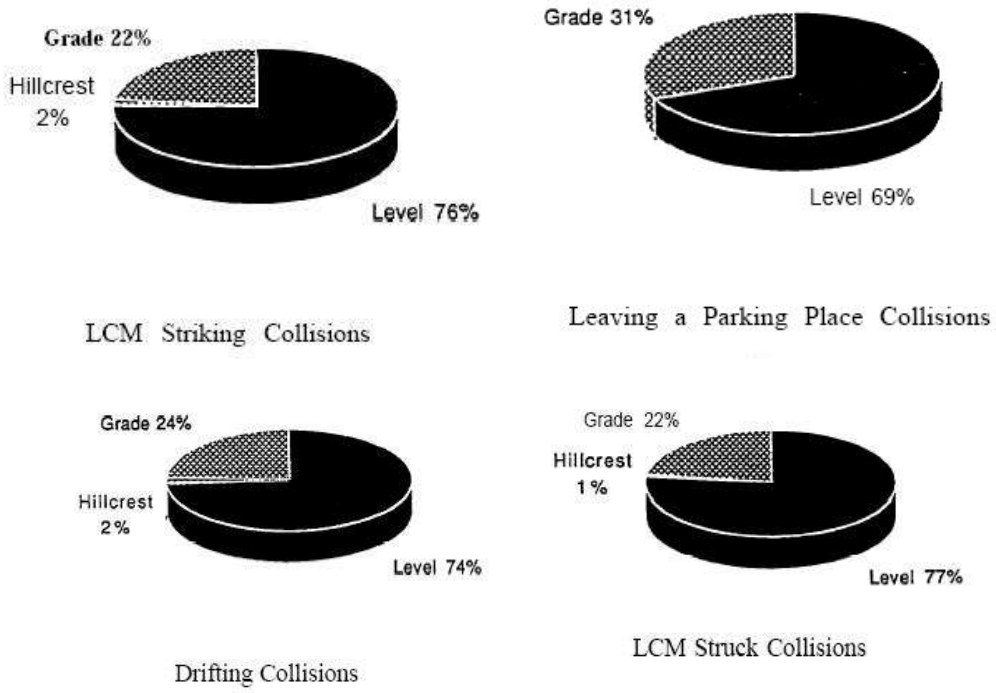
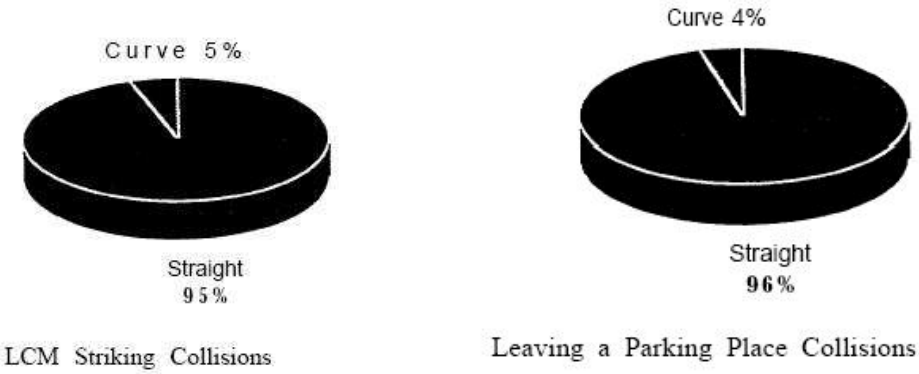


Figura 12-25. Accidentes LCM y trazado en alzado

En cuanto al **trazado en planta**, los accidentes LCM no suelen darse con trazado curvo.



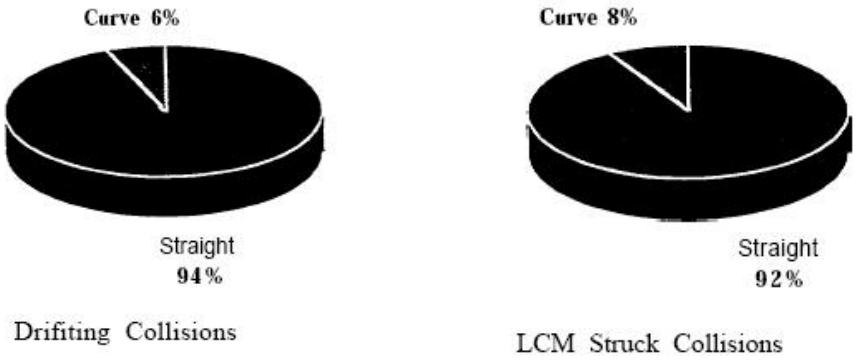


Figura 12-26. Accidentes LCM y trazado en planta

Se analiza la diferente siniestralidad que tienen los diferentes **tipos de vehículos**. Los vehículos pesados tienen una mayor tendencia a sufrir este tipo de accidentes, debido a su falta de maniobrabilidad y a la obstrucción visual de la caja trasera.

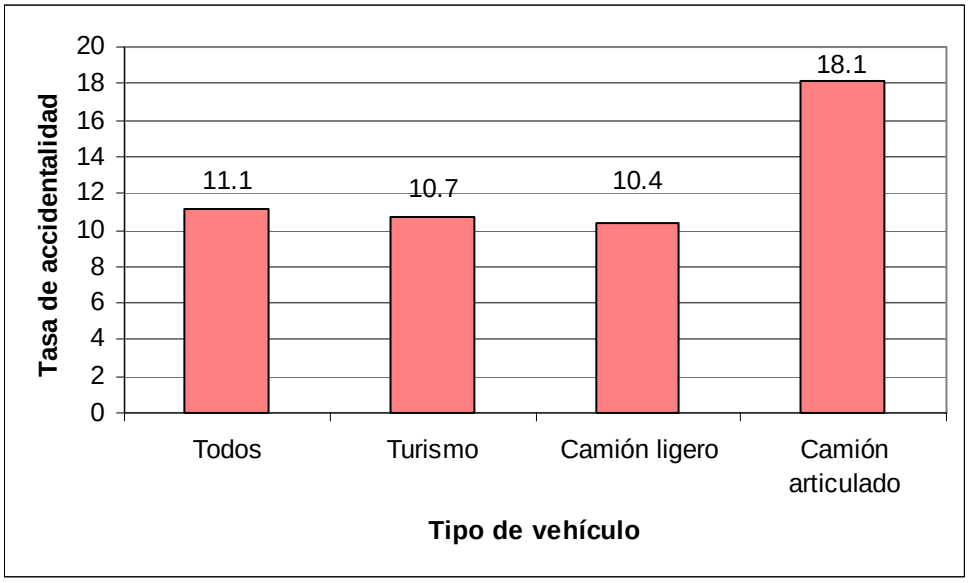


Figura 12-27. Accidentes LCM por cada 100 millones de millas-veh, por tipo de vehículo

Los camiones tienen más accidentes de este tipo cuando cambian a derecha desde la izquierda. Es normal, pues es una maniobra en la que no tienen visión. La caja trasera del camión les impide ver adecuadamente.

Como se comenta en "A study of commercial motor vehicle electronics-based rear and side object detection systems" (NHTSA, 1994), los camiones articulados ("combination-unit truck") tienen más accidentes de este tipo que los camiones de caja simple, corroborando lo que se puede observar en el gráfico.

Asimismo, en el estudio de Wang y Knipling se comenta que las caravanas también sufren problemas de visibilidad, de modo que se esperan mayores tasas de accidentes, y así lo corroboran las tasas de accidentes sufridos anualmente por cada 1000 vehículos, que

es de 1,25 en turismos que no sean caravanas y de 1,60 para las caravanas, de modo que éste también sería en principio otro grupo al cual los avances para mitigar estos accidentes ayudarían en gran medida.

Slop y otros (1996) comentan los datos de accidentalidad en Europa Occidental. En el apartado de intersecciones, extraeremos las conclusiones que siguen:

- Las estadísticas de intersecciones de **cuatro ramales** de entrada son considerablemente mayores que las de tres tramos.
- El tipo de accidente más frecuente es el relacionado con el **giro a izquierda de la carretera prioritaria** (con preferencia). En segundo lugar, el relacionado con los giros a izquierda y cruces desde la carretera sin preferencia.
- Los **giros a derecha** no parecen constituir un problema grave desde el punto de vista de la seguridad, según estos autores.

12.5.3 Causas

Para finalizar, Chovan y otros (1994) distingue en los accidentes a dos tipos de conductores: el **sujeto activo**, que corresponde al vehículo que inicia la maniobra (incorrectamente); y el **sujeto pasivo**, que recibe el golpe del sujeto activo. En este texto se comenta que la mayoría de los conductores activos "no vieron" al otro vehículo antes de iniciar la maniobra.

El gráfico siguiente ilustra estas afirmaciones (Figura 12-28). En blanco aparece la porción de conductores que en ningún momento vieron al otro vehículo, en rayado la de sujetos que vieron el otro vehículo antes de la maniobra, y en gris aquellos que lo vieron tras la maniobra. Se puede ver claramente que la mayoría de conductores **no eran conscientes de la presencia del otro vehículo** y, probablemente, esa fue la principal causa del accidente

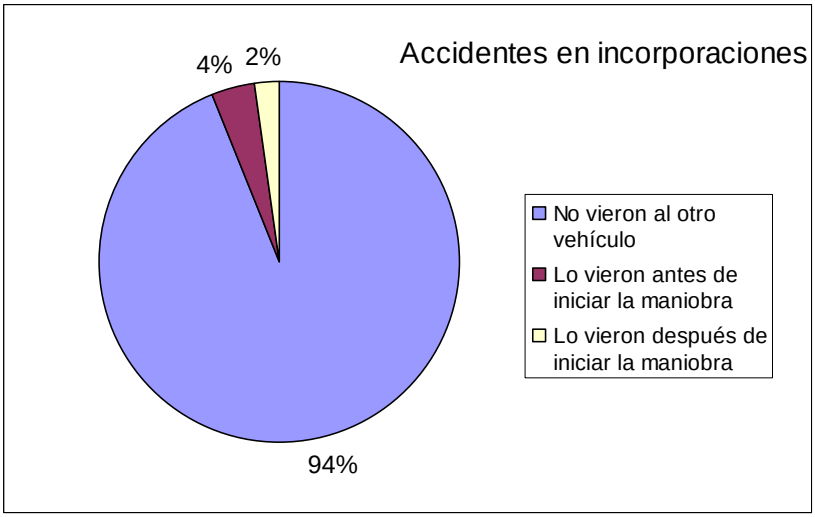


Figura 12-28. Porcentaje de conductores que no vieron al vehículo opuesto

Muy pocos lo vieron antes, pero no pudieron hacer nada, o bien lo vieron tarde. Si hubo accidente es porque no lo vieron. Es decir, iban distraídos, miraron a otro sitio, o bien este vehículo estaba en el ángulo muerto. Esto indica que este tipo de maniobra produce accidentes precisamente por la falta de visibilidad.

En la misma línea, un estudio de Wang y Knipling (1994), indica que el 75% de los accidentes de cambio de carril/incorporación se deben a una **falta de percepción** por parte de alguno de los conductores implicados en la colisión.

Otro estudio de U. S. Department of Transportation (1995), enuncia las diferentes causas de los accidentes LCM de la siguiente manera. El porcentaje de aquellos que no vieron es menor, pero considera una nueva clase, que es aquellos que miraron, pero no calcularon bien el hueco.

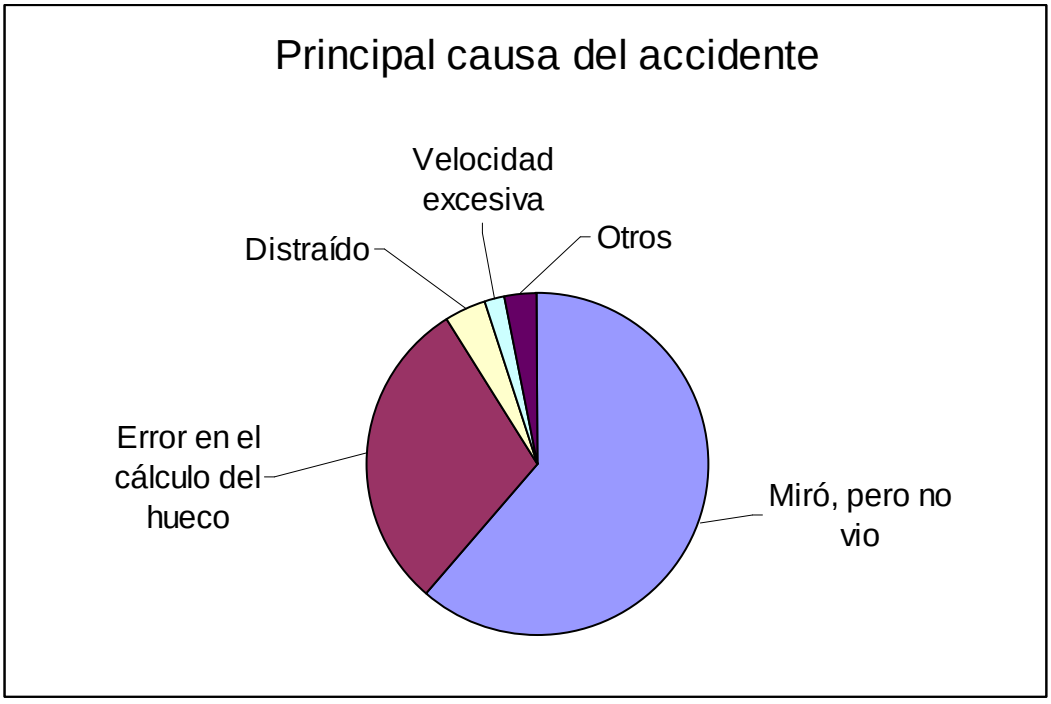


Figura 12-29. Causas de accidentes LCM, según US DOT (1995)

Todos estos datos extraídos de estadísticas muestran que, en la mayoría de los casos, los causantes de los accidentes no son las circunstancias de la carretera o el clima (ya que las condiciones de conducción eran óptimas), sino los despistes y errores humanos. Es decir, estos accidentes suelen suceder porque el conductor que realiza el cambio de carril no percibe al otro automóvil, produciéndose una colisión al iniciar el cambio de carril o incorporación el primero, y al no percibir esa presencia, estos conductores no realizan ninguna maniobra que pueda evitar la colisión. Young y otros (1995) apoyan estas conclusiones, afirmando que en la mayoría de estos accidentes el conductor no percibe al otro vehículo y las velocidades de estos son muy similares en el 78 % de estas colisiones.

12.6 Modelos de estimación de la accidentalidad

12.6.1 Introducción

Los analistas de la seguridad vial, han intentado durante los últimos años desarrollar **modelos de estimación** que permitan predecir la accidentalidad de una carretera existente o futura, especialmente sus intersecciones. Estos modelos se han obtenido la mayoría de las veces a partir de una serie de datos estadísticos de accidentes en una serie de localizaciones, junto con una observación de las características de la vía en el lugar del accidente.

Históricamente, muchos de estos modelos son **modelos de regresión múltiple**. En ellos, el número de accidentes esperable en un determinado lapso de tiempo (usualmente, un año), depende directamente de una serie de factores geométricos de la vía. Los investigadores han usado análisis de regresión de distribución de Poisson, así como de distribución binomial negativa. Estas funciones de probabilidad son teóricamente adecuadas para sucesos raros, con una tasa de aparición baja.

Estos modelos no han conseguido, no obstante, aislar adecuadamente los efectos de cada uno de los factores involucrados. Existe la tentación de suponer que dichos efectos son independientes entre sí, cuando esto no siempre es cierto. Si las variables independientes de un modelo de regresión están íntimamente relacionadas entre sí, resulta muy difícil aislar su efecto en la variable dependiente.

No obstante, sería bueno conocer hasta qué punto la **oblicuidad**, como un factor más de la geometría de la vía, puede hacer que una intersección tenga más accidentes (en igualdad del resto de factores).

12.6.2 Relaciones básicas

Los primeros estudios realizados en este sentido, relacionan la tasa de accidentalidad con el **volumen de tráfico de la intersección**.

McDonald, en 1953, ya realiza un estudio para la estimación de accidentalidad en intersecciones: "Relation between number of accidents and traffic volume at divided-highway intersections".

Tras analizar los datos estadísticos disponibles de un gran número de intersecciones en California llega a la siguiente conclusión. La relación entre el número esperado de accidentes en una intersección y el tráfico de la misma puede describirse así:

$$N = a \cdot (V_1)^b \cdot (V_2)^c$$

Donde N es el número medio de accidentes al año, V_1 es el volumen de tráfico de la vía principal, y V_2 es el volumen de tráfico de la vía secundaria. Los parámetros a, b y c deben calcularse para cada caso concreto, en función de los datos estadísticos disponibles.

Según el valor que adoptan los parámetros b y c para las intersecciones que analizaron en California, obtuvieron que el número de accidentes es mucho más sensible al volumen de la vía secundaria que al de la vía principal.

Otros estudios posteriores usaron ese tipo de relación. Por ejemplo, Webb, en 1955 llega a similares conclusiones. Pero da valores de los parámetros a, b y c ligeramente diferentes. Además, estudia cómo varían esos parámetros para ciertos tipos de intersecciones, según la ubicación.

Hauer y otros (1988) obtienen la misma ecuación, con parámetros diferentes. También Bonnesson y McCoy en 1993.

En el texto "Intersafe - Guía técnica de seguridad para el diseño de carreteras interurbanas" (Slop y otros, 1996), incluyen un modelo aproximado de estimación de la accidentalidad en intersecciones a nivel de vías principales.

El número de accidentes con heridos de vehículos de motor en intersecciones de carreteras rurales tiende a aumentar con el **límite de velocidad** local y con la intensidad de circulación total. Excepto en glorietas, el número de accidentes también aumenta según la relación existente entre la intensidad de circulación de la vía secundaria respecto de la principal.

Esto da lugar a una ecuación:

$$A = a \cdot Q^b \cdot p^c$$

En la que:

A = número anual de accidentes en vehículos de motor.

Q = intensidad de tráfico total que accede a la intersección.

P = relación entre la intensidad de circulación de la secundaria respecto de la principal.

a, b, c = parámetros de regresión que dependen de la ubicación de la intersección, el límite de velocidad, el número de ramales que llegan, y tipo de intersección.

12.6.3 Otros factores involucrados

A medida que los modelos se van refinando, explicar la accidentalidad de una intersección solamente mediante el volumen de tráfico que circula por ella es insuficiente. Por tanto, empiezan a desarrollarse modelos que incorporan otros factores.

Otro modelo alternativo lo proponen Hakkert y Mahalel (1978). Para ellos, la relación entre el número esperable de accidentes en una intersección y el volumen de tráfico sigue la relación:

$$N = a + b \cdot V$$

Donde N es el número de accidentes al año y V es una variable relacionada con el tráfico que llega a la intersección. La construcción de V es compleja.

Lo importante de este modelo es que incluye un término independiente a en la relación. Es una evidencia de que para valores pequeños de V, el número de accidentes no sólo tiene que ver con el volumen de tráfico. En intersecciones de escaso tráfico, otros factores empiezan a tener su peso.

Uno de los primeros estudios que identificaron otros parámetros además del volumen de tráfico es el de David y Norman (1975). Ordenador de mayor a menor importancia relativa, son:

- Volumen de tráfico para los movimientos implicados.
- Restricciones al cambio de sentido.
- Número de carriles de canalización para el giro a derecha.
- Número de carriles de la vía principal.
- Tipo de regulación ("stop" o "ceda").

- Ancho de carril de la vía sin preferencia.
- Mediana
- Número de carriles de canalización para el giro a izquierda.

Vogt (1999) enumera los **factores geométricos** de las intersecciones que se han demostrado como influyentes en la seguridad de las mismas. En este texto se revisa la literatura existente de manera somera, pero suficiente para nuestros propósitos.

Los factores analizados por diversos autores, y con influencia demostrada en la accidentalidad de las intersecciones son:

- La canalización.
- La visibilidad.
- El trazado y la concordancia entre trazado en alzado y trazado en planta.
- La oblicuidad.
- La anchura de carril, anchura de mediana, anchura de arcén.
- La señalización.
- La iluminación.
- El entorno en el que se sitúa la intersección.
- El tráfico pesado.
- La velocidad de las vías.
- Las condiciones meteorológicas.

En otro estudio similar, Bauer y Harwood (1999) exponen la siguiente lista de factores que resultan significativos:

- el volumen de tráfico,
- número de direcciones posibles,
- la velocidad de la carretera principal,
- si hay regulación de prioridad o no,
- si hay canalización, y el número de carril exclusivos para giro,
- si hay iluminación o no,
- el tipo de semaforización y los tiempos de cada fase, y
- si el terreno es montañoso.

Pero no tienen en cuenta el ángulo entre las carreteras (oblicuidad) como factor.

Harwood y otros (2000) revisa los factores que son significativos a la hora de determinar el nivel de seguridad de una vía. Y enumera los siguientes, en los que sí aparece la oblicuidad como factor:

- el ancho de carril,
- ancho del arcén, tipo de arcén,
- trazado en planta,
- trazado en alzado (pendientes),
- densidad de tráfico,

- carriles de giro a la izquierda,
- carriles de adelantamiento,
- carriles exclusivos de giro a derecha o izquierda,
- ángulo de oblicuidad,
- control del tráfico y tipo de regulación,
- distancia de visibilidad, y
- frecuencia en los accesos.

Pero observando el tipo de variables y su peso en el total de la variabilidad, resulta clara otra cosa: **la siniestralidad de una intersección no puede explicarse únicamente mediante las características geométricas de la misma**. Muchos de los accidentes ocurridos no tienen nada que ver con el diseño de la intersección. Sólo un pequeño porcentaje (del 5% al 14%) de los accidentes totales está relacionado directamente con la geometría de la intersección. Sin embargo, las variables "volumen de tráfico" influyen marcadamente en el resultado. Podemos concluir que mejorando el diseño de las intersecciones disminuiremos la accidentalidad de las mismas sólo ligeramente.

Un estudio de Vogt y Bared (1998) atribuye el 2% de la variabilidad estadística en los niveles de siniestralidad entre unas intersecciones y otras a la geometría de la intersección. Sin embargo, el volumen de tráfico puede explicar un 27% de dicha variabilidad.

Yinhai Wang y otros (2003) estudian el mecanismo de ocurrencia de accidentes de tipo alcance en intersecciones semaforizadas.

Para este tipo de accidentes por alcance, los autores proponen un modelo conceptual que explica la generación del accidente. La colisión es el resultado de una serie de procesos. Primero, el vehículo precedente tiene que frenar debido algún impedimento o perturbación (el semáforo cambia, aparecen peatones, el vehículo anterior va a realizar una maniobra, etc.). Si esto ocurre, el vehículo que lo sigue deberá detectar a tiempo la frenada del precedente. Si no lo consigue, no frenará lo suficiente y le alcanzará por detrás, dando como resultado la colisión.

En las semaforizadas de este estudio se dan circunstancias muy diferentes a las intersecciones no semaforizadas. No obstante, el mecanismo de ocurrencia de accidentes es muy ilustrativo. Incluye el **factor humano** como causante del accidente, por comparación del tiempo de percepción reacción disponible con el necesario.

Las variables que explican que el conductor precedente frene bruscamente son:

- El límite de velocidad legal en el ramal del nudo. Si el conductor va lento, es menos probable que surjan problemas.
- La semaforización. La presencia de un semáforo en rojo es una causa para frenar. Si no hay semáforo, no se frena.
- El número de cruces a distinto nivel del nudo. Si los hay, la maniobra de cruce se hace sin detenerse, sin entrar en conflicto con otras trayectorias.
- El número de carriles. Si hay muchos, el conductor puede hacer una maniobra evasiva cambiando de carril.
- La ubicación (rural o urbana).

- La presencia de mediana.
- El ángulo de la intersección. La oblicuidad de la intersección provoca más posibilidades de tener que frenar.
- Las intensidades de tráficos totales y de cada ramal de giro. A mayor volumen de tráfico, especialmente de tráfico girando a derechas y a izquierdas, más conflictos entre vehículos.

Las variables que explican que el conductor posterior no sea capaz de frenar a tiempo son:

- El número de carriles.
- El número de cruces a distinto nivel.
- El ruido visual, las distracciones existentes. Es más probable que el conductor vaya distraído y se dé cuenta tarde de que tiene que frenar.
- La luminosidad. Si es por la noche, más accidentes.
- El límite de velocidad.
- La pendiente. Afecta a la longitud de frenada.

12.6.4 Funciones estadísticas aplicables

En el texto "Statistical Models of At-Grade Intersection Accidents – Addendum" (Bauer y Harwood, 1999), los autores presentan un modelo de estimación de accidentes en intersecciones.

Las estadísticas de las que parten son de accidentes con intervención de la policía, recogidos en una base de datos del California Department of Transport, durante los años 1990 y 1992. La distribución observada se corresponde bastante bien con una binomial negativa. A continuación se muestra un ejemplo, correspondiente a un tipo de intersecciones estudiadas (hay más tipos).

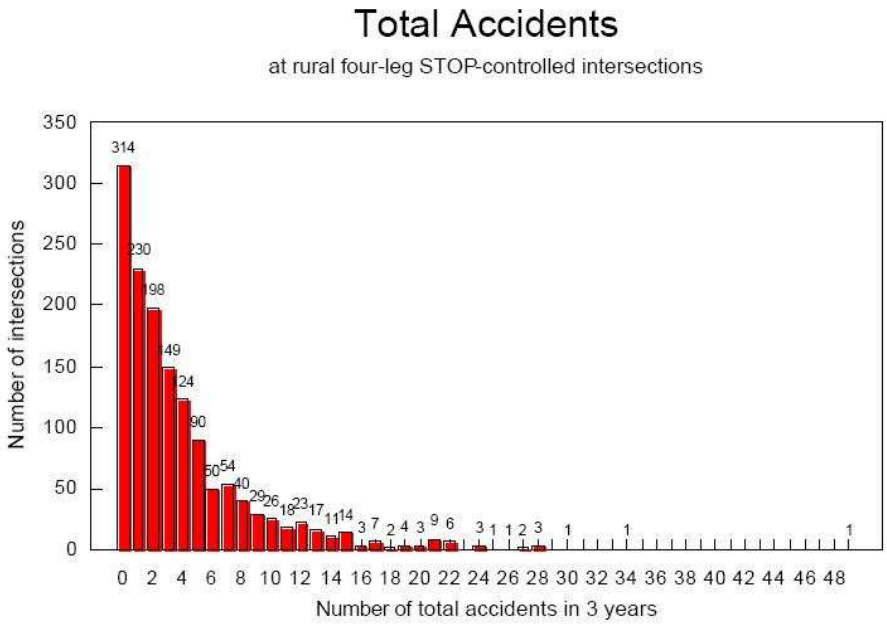


Figura 12-30. Datos de accidentes recogidos en California

Existe un cierto consenso en que los accidentes pueden considerarse sucesos raros, poco frecuentes, e independientes entre sí. Puede que un accidente llega a desembocar en otro, y entonces esta hipótesis sería falsa. Pero los accidentes múltiples pueden ser tratados como uno sólo, salvando el problema.

En el campo de la estadística, estos sucesos se asocian a **distribuciones de Poisson**, caracterizadas porque ocurren μ sucesos (de media) en una unidad de tiempo. La probabilidad de que en un año haya Y accidentes, si de media hay μ, es:

$$P(Y = y) = e^{\mu} \frac{\mu^{y}}{y!}$$

El problema de la distribución de Poisson es que la relación entre la media y la varianza de la distribución es constante e igual a 1. El siguiente paso para conseguir una función más general, es relajar esa relación, permitiendo otros valores para la dispersión. Esto es lo que tiene la **distribución binomial negativa**. La varianza de la distribución se considera igual a:

$$\sigma = \mu + K \cdot \mu^2$$

Donde K es un parámetro nuevo de la distribución, denominado parámetro de dispersión.

Ahora la probabilidad de que en un año determinado haya Y accidentes, siendo los parámetros de la distribución K y μ es una función mucho más compleja, denominada binomial negativa.

$$P(Y = y) = \frac{1}{y!} \cdot \frac{\Gamma(y + 1/K)}{\Gamma(1/K)} \cdot \left(\frac{K\mu}{1 + K\mu} \right)^{y} \cdot (1 + K\mu)^{-1/K}$$

El objetivo del modelo estadístico es obtener una relación entre el número de accidentes esperable en una intersección "i", μ_i , y una serie de "q" parámetros que caractericen dicha intersección: X_{i1}, X_{i2}, … , X_{iq}. Dicha relación se pretende que sea **lineal**, para conseguir un modelo sencillo.

$$\text{Function}(\mu_i) = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \ldots + \beta_q X_{iq}$$

$$\log(\mu_i) = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \ldots + \beta_q X_{iq}$$

$$\mu_i = \exp(\beta_0)\ \exp(\beta_1 X_{i1})\ \exp(\beta_2 X_{i2})\ \ldots\ \exp(\beta_q X_{iq})$$

Donde $\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_q$ son coeficientes a determinar.

Para tener en cuenta el volumen de tráfico de las vías que llegan a la intersección, se utiliza la variable ADT (*average daily traffic*), de la siguiente manera:

$$\mu_i = \exp(\beta_0)\left(\text{ADT}_{\text{major road}}\right)^{\beta 1}\left(\text{ADT}_{\text{crossroad}}\right)^{\beta 2}\ \exp(\beta_3 X_{i3}) \bullet \ \ldots\ \bullet\ \exp(\beta_q X_{iq})$$

Los valores de los coeficientes β_q pueden consultarse en dicho texto. A continuación se expone un ejemplo, con valores concretos de los coeficientes para un tipo de intersección.

$$Y = e^{-5.073} (X_1)^{0.635} (X_2)^{0.294} \exp(-0.969\ X_3) \exp(-0.518\ X_4) (X_5)^{-0.091} \exp(0.340\ X_6) \exp(0.087\ X_7) \exp(-0.331\ X_8) \exp(-0.175\ X_9)$$

Se ha presentado una **relación lineal entre las características de la intersección y la media de los accidentes que ocurren en ella al año**. En cuanto a la distribución de los valores reales de accidentes en la intersección, se consideran dos tipos distintos de distribuciones, aunque similares. Por un lado, puede considerarse que el número de accidentes anuales en la intersección es una variable de Poisson de media μ. Por otro lado, puede considerarse que es una variable binomial negativa, de media μ y de varianza $\mu + K \cdot \mu^2$. La distribución binomial negativa tiende a ser parecida a la de Poisson para valores de K cercanos a 0.

La elección de una u otra depende de los datos disponibles y de la capacidad para abordar un modelo más complejo como el del segundo caso. Miaou y Lum (1993), Bauer y Harwood (1996) y Vogt y Bared (1998) usan ambos tipos de modelos. Cada uno tiene su utilidad. Será preferible un modelo binomial negativa (o doble Poisson) al modelo de Poisson, siempre que tengamos suficientes datos.

Harwood y otros (2000) presentan un modelo de estimación en el que cada uno de los factores involucrados queda perfectamente especificado. Es una evolución este modelo anterior. El algoritmo de predicción de accidentes consiste en un valor base y factores de modificación que se multiplican con él.

El modelo base proporciona una estimación de la seguridad de una carretera o intersección para unas condiciones nominales o base. Con él obtenemos el valor base.

Los factores de modificación de los accidentes ajustan las predicciones del modelo base para tener en cuenta los efectos de seguridad de los diversos parámetros estudiados.

$$N_{\text{int}} = N_{base} \cdot AMF_1 \cdot AMF_2 \cdot \ldots \cdot AMF_n$$

N_{int} es el número de accidentes al año estimados para la intersección;

N_{base} es el número de accidentes al año, estimados en condiciones nominales;

AMF_i es cada uno de los **factores de amplificación** (o reducción) calculados. Cada uno tiene en cuenta una característica geométrica de la carretera. Son los equivalentes a $\exp(\beta_i \cdot X_i)$ de la expresión anterior.

12.6.5 Otros modelos

Yinhai Wang y otros (2003) estudian el mecanismo de ocurrencia de accidentes en intersecciones semaforizadas.

Para este tipo de accidentes por alcance, los autores proponen un **modelo conceptual** que explica la generación del accidente. La colisión es el resultado de una serie de procesos. Primero, el vehículo precedente tiene que frenar debido algún impedimento o perturbación (el semáforo cambia, aparecen peatones, el vehículo anterior va a realizar una maniobra, etc.). Si esto ocurre, el vehículo que lo sigue deberá detectar a tiempo la frenada del precedente. Si no lo consigue, no frenará lo suficiente y le alcanzará por detrás, dando como resultado la colisión.

La presencia de perturbaciones en el tráfico que pueden hacer que un vehículo frene bruscamente se considera que sigue una distribución de Poisson. Si la presencia de una perturbación de tipo j tiene una frecuencia η_j, entonces la función densidad es:

$$f(t)=\eta_j e^{-\eta_j t} \quad \text{for} \quad t>0$$

Y la probabilidad de que exista dicha perturbación en un tiempo t es:

$$P_j=\int_0^t \eta_j e^{-\eta_j t} dt = 1-e^{-\eta_j t}$$

La probabilidad de que exista alguna perturbación se obtiene combinando las probabilidades para *j=1* hasta *n*, es decir, para cada uno de los tipos de perturbación que se consideren. Obtenemos:

$$P_o = 1-e^{-\Sigma_j \eta_j t}$$

Para estimar las variables "tiempo de percepción-reacción necesario" y "tiempo de percepción-reacción disponible" usan distribuciones Weibull, cuya función densidad es:

$$f(\alpha,\lambda,t)=\alpha\lambda t^{\alpha-1}e^{-\lambda t^{\alpha}} \quad \text{for} \quad t>0$$

Usualmente, los ingenieros consideramos el tiempo de percepción-reacción como una constante igual a 2,5 s. En la realidad, el tiempo disponible y el necesario siguen distribuciones estadísticas, cuyos parámetros dependen de diversos factores.

La probabilidad de que el tiempo de percepción-reacción disponible sea menor que el necesario, tras operar, se obtiene:

$$P_f=\frac{1}{1+e^{-\varphi \mathbf{Z}}}$$

En esta fórmula, *Z* es un vector que representa el estado de las variables que hacen que los tiempos de reacción necesario y disponible varíen.

Finalmente, la probabilidad de que ocurra un accidente en el ramal *k* de la intersección *i* es:

$$P_{ik}=P_{oik}\cdot P_{fik}=\frac{1-e^{-e^{\beta \mathbf{X}_{ik}}}}{1+e^{-\varphi \mathbf{Z}_{ik}}}$$

Sólo falta determinar los vectores de coeficientes β, φ, que determinan la contribución de cada una de las variables explicativas que se consideren (vectores *X*, *Z*). Se trata de una multiplicación vectorial, de orden *n*, siendo *n* el número de factores que vayamos a tener en cuenta.

Los estimaron con datos de 150 intersecciones en Japón, durante los años 1992 y 1995, obteniendo un valor de bondad del ajuste $R^2 = 0.698$, bastante alto.

Las variables que explican que el conductor precedente frene bruscamente, están recogidas en el vector *X*. Mientras que las variables que explican que el conductor posterior no sea capaz de frenar a tiempo quedan recogidas en el vector *Z*.

Los valores de los correspondientes coeficientes β, φ, puede consultarse en el texto. Aquí lo que nos interesa es el método seguido para estimar estas probabilidades, las distribuciones estadísticas asumidas, y los factores encontrados significativos.

12.7 Análisis de factores relacionados con la investigación

12.7.1 La oblicuidad

Vogt (1999) introduce la oblicuidad de la intersección en su modelo de estimación de siniestralidad en las intersecciones. Para ello, utiliza dos variables distintas.

La primera, denominada *DEV*, está definida así:

$DEV = | \alpha - 90^o |$

Siendo α el ángulo menor de los que forman entre sí las vías secundaria y primaria.

La segunda, denominada *HAU*, es una variable con signo:

$HAU = \alpha - 90^o$; si $\alpha > 90^o$; o bien,

$HAU = 90^o - \alpha$; si $90^o > \alpha$.

Siendo α el ángulo entre la vía principal y la secundaria, medido según las agujas del reloj, varía entre 0º y 180º. Esta segunda variable sirve para diferenciar oblicuidad a derechas de oblicuidad a izquierdas.

Al correlacionar estas variables con los datos estadísticos de siniestralidad, se obtuvieron los siguientes resultados.

En intersecciones en "T" e "Y", la oblicuidad es una variable bastante significativa, a incluir en el modelo, siendo más explicativa la variable *HAU* que *DEV*. Esto era de esperar, puesto que *HAU* describe mejor la situación, al tener signo.

En intersecciones de cuatro ramales, es decir, de tipo "+" o "X", ninguna de estas variables resultó ser significativa. Esto puede ser debido, según palabras del autor, a que en las intersecciones estudiadas hay muy pocas que sean con una cierta oblicuidad. Casi todas las intersecciones que se estudiaron eran sensiblemente perpendiculares, por lo que estudiar la oblicuidad en ellas es bastante difícil.

Por otro lado, lo que aquí se está exponiendo como oblicuidad de la intersección es sólo el ángulo entre los ejes de las vías involucradas. Realmente, si hay un cierto grado de canalización, el efecto de la oblicuidad queda mitigado. El resultado final depende más del diseño de la canalización que del ángulo que forman las vías entre sí.

Hanna y otros (1976) encuentra que las intersecciones en "Y" son hasta un 50% más inseguras que la correspondiente "T".

Bonneson y McCoy (1993) exponen que las intersecciones con oblicuidad, con regulación por "stop", en carreteras de doble sentido, tienen más accidentes que las que no son oblicuas.

En Harwood y otros (2000) se presenta un algoritmo para predecir la seguridad en una carretera rural de dos carriles. El algoritmo de predicción de accidentes **consiste en un modelo base y factores de modificación** (*accident modification factors = AMF*) de los accidentes para segmentos de carreteras e intersecciones a nivel en carreteras rurales de dos carriles. El modelo base proporciona una estimación de la seguridad de una carretera o intersección para unas condiciones nominales o base.

Los factores de modificación de los accidentes ajustan las predicciones del modelo base para tener en cuenta los efectos de seguridad en segmentos de carretera según una serie de parámetros de la vía, entre ellos la oblicuidad.

El valor de este coeficiente es de:

$AMF = \exp(0.0040 \cdot \alpha)$ para intersecciones de tres ramales,

$AMF = \exp(0.0054 \cdot \alpha)$ para intersecciones de cuatro ramales, con "stop".

La variable α es la oblicuidad de la intersección, definida como la diferencia absoluta del ángulo entre la vía principal y la secundaria, respecto a 90º. Dado el valor tan bajo del coeficiente que multiplica a α, el coeficiente *AMF* tiene una relación casi lineal respecto a la oblicuidad. Al aumentar la oblicuidad, aumenta la siniestralidad. Esta relación queda ilustrada en la Figura 12-31, donde puede observarse que, a pesar de ser una ley exponencial, podría ajustarse como una ley lineal (más sencilla).

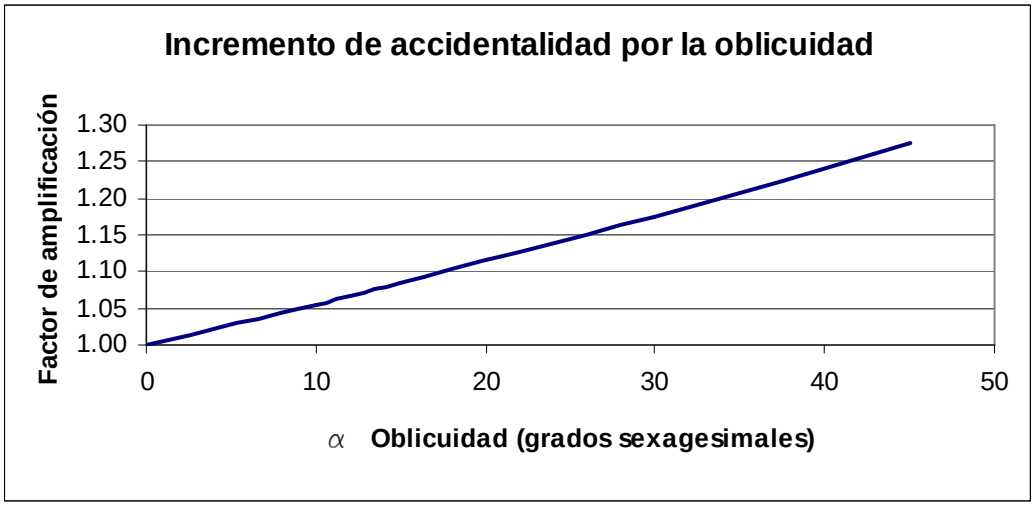


Figura 12-31. Factor de amplificación de accidentalidad, para intersección de 4 ramales.

En intersecciones semaforizadas la oblicuidad es mucho menos importante. En ellas, el funcionamiento de los semáforos separa las maniobras conflictivas, y el riesgo de colisión por oblicuidad se reduce enormemente. Por tanto, *AMF* = 1 para todas las intersecciones semaforizadas, independientemente de su oblicuidad.

A continuación se muestra la Tabla 12-6 y la Tabla 12-7 en las que podemos observar la variación en el número de accidentes al año al ir aumentando la oblicuidad (*skew angle*) a igualdad del resto de parámetros.

Major-road ADT (veh/day)	Minor-road ADT (veh/day)	Skew angle (degrees) 0 BASE	10	15	30	45
		ACCIDENTS PER YEAR				
400	50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	100	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	400	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
1,000	100	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
	500	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11
	1,000	0.13	0.14	0.14	0.15	0.16
3,000	100	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12
	500	0.22	0.23	0.23	0.25	0.26
	1,000	0.30	0.31	0.32	0.34	0.36
	3,000	0.52	0.54	0.55	0.59	0.62
5,000	100	0.15	0.16	0.16	0.17	0.18
	500	0.32	0.34	0.34	0.37	0.39
	1,000	0.46	0.47	0.48	0.51	0.55
	3,000	0.78	0.81	0.83	0.88	0.94
	5,000	1.00	1.04	1.06	1.13	1.20
10,000	100	0.25	0.26	0.27	0.28	0.30
	500	0.56	0.58	0.59	0.63	0.67
	1,000	0.79	0.82	0.84	0.89	0.94
	3,000	1.35	1.40	1.43	1.52	1.61
	5,000	1.73	1.80	1.84	1.95	2.07
	10,000	2.43	2.53	2.58	2.74	2.91

Tabla 12-6. Número de accidentes y oblicuidad, en intersecciones de tres brazos

Major-Road ADT (veh/day)	Minor-Road ADT (veh/day)	Skew Angle (degrees) 0 BASE	10	15	30	45
		ACCIDENTS PER YEAR				
400	50	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
	100	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07
	400	0.12	0.13	0.13	0.15	0.16
1,000	100	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12
	500	0.25	0.26	0.27	0.29	0.31
	1,000	0.37	0.40	0.41	0.44	0.48
3,000	100	0.18	0.19	0.19	0.21	0.23
	500	0.47	0.50	0.51	0.56	0.61
	1,000	0.72	0.76	0.74	0.85	0.92
	3,000	1.42	1.49	1.54	1.66	1.81
5,000	100	0.24	0.25	0.26	0.28	0.31
	500	0.64	0.68	0.70	0.76	0.82
	1,000	0.98	1.04	1.07	1.16	1.25
	3,000	1.92	2.03	2.09	2.26	2.45
	5,000	2.63	2.71	2.85	3.09	3.35
10,000	100	0.37	0.39	0.40	0.43	0.47
	500	0.98	1.03	1.06	1.15	1.25
	1,000	1.49	1.57	1.62	1.75	1.90
	3,000	2.92	3.08	3.16	3.43	3.72
	5,000	3.98	4.20	4.32	4.68	5.08
	10,000	6.08	6.41	6.59	7.15	7.75

Tabla 12-7. Número de accidentes y oblicuidad, en intersecciones de cuatro brazos

Yinhai Wang y otros (2003) estudian el mecanismo de ocurrencia de accidentes en intersecciones semaforizadas.

Para este tipo de accidentes por alcance, los autores proponen un modelo conceptual que explica la generación del accidente. La colisión es el resultado de una serie de procesos. Primero, el vehículo precedente tiene que frenar debido algún impedimento o perturbación (el semáforo cambia, aparecen peatones, el vehículo anterior va a realizar una maniobra, etc.). Si esto ocurre, el vehículo que lo sigue deberá detectar a tiempo la frenada del precedente. Si no lo consigue, no frenará lo suficiente y le alcanzará por detrás, dando como resultado la colisión.

Con respecto a la oblicuidad, hemos visto que **en una intersección oblicua es más frecuente encontrar una frenada del vehículo precedente relativamente brusca**, ocasionando un cierto riesgo de colisión por alcance. Concretamente, el coeficiente que tiene en cuenta este efecto es:

$$P_0 = 1 - e^{-e^{\beta X_{ik}}}$$

$X = 0$ si la intersección no es oblicua.

$X = 1$ si la intersección sí es oblicua.

Dicho factor vale 0,632 cuando la intersección no es oblicua. Y vale 0,828 cuando la intersección tiene más de 105º. Es decir, se produce un incremento del 31% de posibilidades de que el vehículo precedente tenga que frenar, con lo que se induce un incremento neto en las probabilidades de un alcance en esa intersección.

Los autores comentan que esto es normal puesto que refleja el incremento de complejidad en los movimientos de giro cuando la intersección tiene un ángulo reducido.

12.7.2 Canalización

A lo largo de este texto se ha ido comentando cómo la instalación de carriles exclusivos para realizar algunos tipos de maniobras puede facilitar la conducción y aumentar la seguridad.

Según Harwood y otros (2002), **la canalización se basa en cuatro principios**:

- Limitar los puntos de conflicto.
- Limitar la complejidad del área de conflicto.
- Limitar la frecuencia de los conflictos.
- Limitar la gravedad de los conflictos.

Para ello, se usan una serie de técnicas, como carriles exclusivos, isletas, medianas, señalización vertical y horizontal, etc. Cada técnica tiene un grado de aplicabilidad diferente, y una efectividad también característica.

Diversos autores han demostrado que la canalización **mejora la seguridad** de la intersección.

Por ejemplo, Harwood y otros (2002) calculan los coeficientes de reducción de siniestralidad, tras instalar en una intersección dada, carriles de giro a izquierdas y carriles de giro a derechas. Sus resultados se muestran en la Tabla 12-8 y la Tabla 12-9.

Intersection type	Intersection traffic control	Number of major-road approaches on which left-turn lanes are installed	
		One approach	Both approaches
Three-leg intersection	STOP sign[a]	0.56[b]	—
	Traffic signal	0.85[c]	—
Four-leg intersection	STOP sign[a]	0.72[d]	0.52[d]
	Traffic signal	0.82[c]	0.67[c]

Tabla 12-8. Reducción en los accidentes tras instalar carriles de giro a izquierda

Intersection traffic control	Number of major-road approaches on which right-turn lanes are installed	
	One approach	Both approaches
STOP sign[a]	0.86[b]	0.74[b]
Traffic signal	0.96[c]	0.92[c]

Tabla 12-9. Reducción en los accidentes tras instalar carriles de giro a derecha

En el texto "Median intersection design" (Harwood y otros, 1995) se demuestra que cuanto más ancha es la mediana en intersecciones rurales de cuatro brazos, menos accidentalidad hay.

Harwood y otros (2000), incluyen la Tabla 12-10 y la Tabla 12-11 en la que muestran cómo la inclusión de carriles de giro a izquierda y derecha reducen el número de accidentes.

Major-road ADT (veh/day)	Minor-road ADT (veh/day)	No TLs BASE	One LTL	One RTL	One LTL & one RTL
		ACCIDENTS PER YEAR			
400	50	0.01	0.01	0.01	0.01
	100	0.02	0.02	0.02	0.01
	400	0.04	0.03	0.04	0.03
1,000	100	0.04	0.03	0.04	0.03
	500	0.09	0.07	0.09	0.07
	1,000	0.13	0.10	0.12	0.09
3,000	100	0.10	0.08	0.09	0.07
	500	0.22	0.17	0.21	0.16
	1,000	0.30	0.24	0.29	0.23
	3,000	0.52	0.41	0.50	0.39
5,000	100	0.15	0.11	0.14	0.11
	500	0.32	0.25	0.31	0.24
	1,000	0.46	0.36	0.43	0.34
	3,000	0.78	0.61	0.74	0.58
	5,000	1.00	0.78	0.95	0.74
10,000	100	0.25	0.20	0.24	0.19
	500	0.56	0.44	0.53	0.42
	1,000	0.79	0.61	0.75	0.58
	3,000	1.35	1.05	1.28	1.00
	5,000	1.73	1.35	1.65	1.28
	10,000	2.43	1.90	2.31	1.80

Note: TL=turn lane; LTL=left-turn lane; RTL=right-turn lane.

Tabla 12-10. Canalización y accidentes, intersecciones en "T"

Major-Road ADT (veh/day)	Minor-Road ADT (veh/day)	No TLs BASE	One LTL	Two LTLs	One RTL	Two RTLs	One LTL & One RTL	One LTL & Two RTLs	One RTL & Two LTLs	Two LTLs & Two RTLs
		ACCIDENTS PER YEAR								
400	50	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
	100	0.05	0.04	0.03	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03
	400	0.12	0.09	0.07	0.12	0.11	0.09	0.08	0.07	0.06
1,000	100	0.09	0.07	0.05	0.09	0.08	0.06	0.06	0.05	0.05
	500	0.25	0.19	0.15	0.23	0.22	0.18	0.17	0.14	0.13
	1,000	0.37	0.28	0.21	0.36	0.34	0.27	0.25	0.20	0.19
3,000	100	0.18	0.14	0.10	0.17	0.16	0.13	0.12	0.10	0.09
	500	0.47	0.36	0.27	0.45	0.43	0.34	0.32	0.26	0.25
	1,000	0.72	0.55	0.42	0.69	0.65	0.52	0.49	0.40	0.38
	3,000	1.42	1.08	0.82	1.35	1.27	1.03	0.97	0.78	0.74
5,000	100	0.24	0.18	0.14	0.23	0.22	0.17	0.16	0.13	0.13
	500	0.64	0.46	0.37	0.61	0.58	0.46	0.44	0.35	0.33
	1,000	0.98	0.74	0.57	0.94	0.89	0.71	0.67	0.54	0.51
	3,000	1.92	1.46	1.11	1.83	1.73	1.39	1.31	1.06	1.00
	5,000	2.63	2.00	1.53	2.50	2.36	1.90	1.80	1.45	1.37
10,000	100	0.37	0.28	0.21	0.35	0.33	0.27	0.25	0.20	0.19
	500	0.98	0.74	0.57	0.93	0.88	0.71	0.67	0.54	0.51
	1,000	1.49	1.13	0.86	1.42	1.34	1.08	1.02	0.82	0.78
	3,000	2.92	2.22	1.69	2.77	2.62	2.11	2.00	1.61	1.52
	5,000	3.98	3.02	2.31	3.78	3.58	2.87	2.72	2.19	2.08
	10,000	6.08	4.63	3.53	5.77	5.47	4.39	4.16	3.35	3.17

Note: TL=turn lane; LTL=left-turn lane; RTL=right-turn lane.

Tabla 12-11. Canalización e accidentes, intersecciones de "+"

Lo que no se dice en ningún texto es cómo las diferentes formas de dimensionar estas canalizaciones, pueden tener más efectividad o menos. Realmente este tipo de estudios no investigan el proceso por el cual estas actuaciones influyen sobre la conducción. Sólo se limitan a estudiar la estadística recogida, sin analizar el cómo.

El propósito de esta investigación es estudiar el proceso por el cual estos ramales de giro, en los que se da siempre una cierta oblicuidad, influyen en el comportamiento de los conductores. Es decir, encontrar el mecanismo por el cual se pueden hacer **canalizaciones más eficientes** a la hora de evitar accidentes.

12.8 Otras formas de medir la seguridad

A lo largo de este texto se ha hecho una identificación entre el grado de seguridad de una intersección y el número de accidentes que en ella se producen, tanto los que tienen víctimas mortales como los que no. Se dice que una intersección (o un tramo de carretera) es "seguro" si el número de accidentes que se producen en él es extremadamente bajo.

El problema es que **los accidentes son sucesos de probabilidad de ocurrencia extremadamente baja**. Esto ocasiona problemas de diversa índole: son más difíciles de registrar, se necesita mucho tiempo (años) para obtener una muestra representativa. A pesar de la intensa investigación realizada en los últimos años para

conseguir estimaciones precisas del número de accidentes en un tramo de carretera determinado, estas tasas de accidentalidad siguen siendo difíciles de precisar.

Esto ha provocado un creciente interés en otras medidas alternativas para evaluar la seguridad. La técnica que más peso está tomando es la relacionada con los conflictos de tráfico.

Amundsen y Hyden (1977) definen "**conflicto**" como un suceso observable en el que dos o más usuarios de la carretera se aproximan entre sí hasta tal extremo que existe riesgo inmediato de colisión si no modifican su trayectoria. La metodología seguida es situar observadores cerca del tramo a estudiar, que registren las frenadas bruscas y las maniobras evasivas realizadas por los conductores para evitar colisiones.

En general, parece haber un consenso en que **infraestructuras con niveles bajos de tasas de conflictos tienen también niveles bajos de accidentalidad** (Gettman y Head, 2003). Aunque hay ciertas dudas sobre si los observadores realizan sus anotaciones de una manera demasiado subjetiva. Esto se suple con sensores, radares, videocámaras, que registran en todo momento la trayectoria de los vehículos. Dicha trayectoria es analizada y detectados los movimientos bruscos según algún criterio preestablecido.

La clave de este procedimiento está en definir el límite que hace que una maniobra evasiva sea considerada un conflicto. Continuamente se generan conflictos, pero hay que seleccionar los conflictos más graves. Esa **gravedad del conflicto** puede determinarse según ciertas variables:

- Hueco, como el lapso temporal entre el final de la maniobra de incorporación o cruce y la llegada del próximo vehículo con preferencia en la vía principal (considerando que éste circula a velocidad constante). La maniobra es conflictiva cuando se hace con un hueco reducido.
- Duración de la maniobra. Una maniobra se convierte en conflictiva cuando su duración excede de un límite.
- Valor de deceleración. Un conflicto es grave cuando se detecta un valor de deceleración por encima de cierto límite, en cualquier vehículo.
- Porción de distancia de parada disponible. Podemos considerar un conflicto como grave cuando la distancia entre dos vehículos es inferior a la distancia de parada.
- Tiempo estimado de colisión. Se produce un conflicto grave cuando el tiempo estimado en el que dos vehículos colisionan (de seguir su misma trayectoria y velocidad) es inferior a un cierto límite.

Esta técnica permite que registrando la operación de la vía durante un tiempo relativamente corto, aparezcan conflictos. Si admitimos una relación directa entre los conflictos y la seguridad, podemos estimar la seguridad de la misma, de una manera más sencilla.

Otra aplicación de esta técnica reside en la **microsimulación**. En una computadora podemos simular el funcionamiento de un tramo de vía. Aunque el modelo de simulación incluya la posibilidad de generar accidentes, éstos sólo ocurren cada mucho tiempo. De esta manera, para que en la simulación ocurrieran accidentes, dicha simulación debería durar años, quizá. Y el tiempo de computación necesario, también sería extremadamente largo. Si la simulación registra la aparición de conflictos, quizá sea suficiente con simular un tiempo más reducido, en un tiempo de computación más

reducido. Rao y Rendaraju (1998) utilizan esta técnica para evaluar la seguridad de intersecciones urbanas, mediante microsimulación.

Puede consultarse una revisión del estado del arte sobre la técnica de los conflictos en Archer (2001).

12.9 Conclusión

En este capítulo se ha analizado el problema de la siniestralidad del tráfico por carretera, que se ha convertido en un grave problema social. Hoy día los accidentes de tráfico son la principal causa de muerte de la población española menor de 35 años (DGT, 2004).

Se han expuesto aquí los diferentes datos estadísticos de los que se dispone, en los que se analizan los diferentes factores involucrados en la accidentalidad. En concreto, se ha estudiado la fracción correspondiente a accidentes en intersecciones: su importancia, los diferentes tipos existentes, y las causas que lo provocan. Se ha señalado que la causa principal de este tipo de accidentes es una deficiente visibilidad. Uno de los vehículos involucrados "no ve" al vehículo con el que choca.

Posteriormente se han presentado diferentes modelos de estimación de siniestralidad para intersecciones, en base a sus características funcionales y geométricas (entre ellas, la oblicuidad).

A lo largo de todo el capítulo se ha podido comprobar cómo las intersecciones son un "punto negro" en la red viaria, y toda medida destinada a paliar esta circunstancia puede salvar vidas humanas. En relación con esta investigación, se ha demostrado que la oblicuidad es un factor de peligrosidad importante, que debe ser evitado.

Este proyecto de investigación tiene como fin analizar de qué manera la oblicuidad en intersecciones genera situaciones de riesgo. Entendiendo el problema podremos acotarlo, proponiendo límites de oblicuidad admisibles. Por otro lado, propondremos recomendaciones prácticas para el diseño de intersecciones y enlaces, que tengan en cuenta este fenómeno.

Ciertamente, un mejor diseño de nuestras carreteras ayudará a reducir el número de accidentes que se produzcan en las mismas.

13 Conductores mayores

13.1 Introducción

Resulta muy importante analizar las condiciones de conducción de estas personas, puesto que, en los próximos años, en todos los países industrializados el **número de personas mayores está aumentando** debido a los avances médicos. Por otro lado, estos individuos intentan ser cada vez más independientes, y recorren más distancia en sus vehículos que hace unos años a esas edades, y mantienen su licencia de conducción vigente por más tiempo.

El uso del automóvil para una persona mayor le permite acceder a servicios y actividades que, de otra manera, estarían fuera de su alcance. Si dejan de conducir, pueden experimentar insatisfacción en sus vidas al verse limitados en sus posibilidades. La soledad y niveles bajos de actividad les pueden llevar a la depresión.

Podemos admitir que **la conducción es un factor importante en la calidad de vida de las personas mayores**, pero entonces hemos de reflexionar si el actual diseño de carreteras tiene en cuenta a estos usuarios.

Los conductores de edad avanzada **tienen más riesgo** de tener un accidente mortal. Esto es debido a dos razones:

- Tienen mayor probabilidad de estar envueltos en un accidente, debido a sus limitaciones fisiológicas (la tasa de accidentalidad por longitud conducida es considerablemente mayor que la equivalente en conductores de mediana edad).

- Sus cuerpos son más frágiles y están más deteriorados, por lo que, ante un mismo accidente, una persona mayor tiene 5 o 6 veces menos probabilidades de salir con vida que una persona joven (Wang y Carr, 2004; Kattak y otros, 2002).

Uno de los lugares en los que un conductor de edad avanzada puede tener problemas es en las incorporaciones, en especial, en **disposiciones oblicuas**. Este apartado analiza con detalle la situación.

13.2 Limitaciones fisiológicas

Los conductores mayores tienen una serie de limitaciones, que resumiremos en cuatro:

- **Visuales**. La agudeza visual y la amplitud del campo de visión disminuyen con la edad. Así mismo, aparecen problemas relacionados con la sensibilidad al contraste, el deslumbramiento, o enfermedades como glaucoma, cataratas, o degeneración macular.

- **Cognitivas**. Con la edad disminuyen habilidades mentales tales como la memoria, capacidad de concentración, reflejos…

- **Motoras**. Estos individuos tienen una menor masa muscular, menos flexibilidad, menos resistencia, lo cual puede dificultarles el control del vehículo, o girar la cabeza para observar el entorno.

- **Enfermedades.** Las personas mayores padecen enfermedades con cierta frecuencia. Algunos de estos males afectan a la capacidad de conducción, pero además, algunos de los medicamentos utilizados en su tratamiento también tienen este efecto.

13.2.1 Visuales

Frank Schieber (1994) realiza una revisión de los últimos estudios (1984-1994) llevados a cabo a nivel internacional por diferentes autores, relacionados con la edad, la visión y la conducción. Se trata de un texto muy interesante, que utilizaremos como base para desarrollar este apartado.

Los **movimientos sacádicos** son los que llevan el objetivo del ojo hacia un punto en concreto de la visión, y son los que realizamos cuando buscamos algo. En las personas mayores, estos movimientos tienen una menor velocidad de pico, y son más imprecisos. Parece ser que necesitan más movimientos hasta centrar su vista en lo que les interesa.

Por el contrario, **movimientos de seguimiento** (*pursuit*) son los que realizamos para seguir con la vista un objeto en movimiento. En las personas mayores, la máxima velocidad a la que pueden fijar su vista es 10 °/s, mientras que es 30 °/s la que pueden alcanzar los jóvenes. Sin embargo, las personas mayores parecen no perder la capacidad de fijar su atención en un estímulo estático.

El **máximo ángulo** que puede abarcar la pupila disminuye con la edad, según un fenómeno denominada miosis senil. Los conos, responsables de la visión central, permanecen prácticamente intactos, mientras que los bastones periféricos disminuyen en número. El número de células neuronales en la corteza visual se mantiene constante.

Otra capacidad que disminuye con la edad es el máximo ángulo vertical en el que la mirada puede fijarse. En los jóvenes es de 45º, pero en las personas mayores puede quedar reducido a 16º.

En cuanto al campo visual horizontal, se puede valorar que un adulto joven puede alcanzar los 190º, mientras que en una persona de edad avanzada puede reducirse hasta 140º (Morgan y King, 2002).

La **adaptación a la oscuridad** es diferente para la zona central (8 minutos) que para la periférica (30 minutos). Esta adaptación es mucho más lenta para las personas mayores que para los jóvenes.

Las personas mayores también pierden **agudeza visual**, sobre todo en condiciones de poco contraste o poca luminosidad. También en observando objetos en movimiento (agudeza visual dinámica).

La agudeza visual perimetral se mide con un test en el que se pide al sujeto que detecte pequeños puntos de luz sobre un fondo constante, en puntos a lo largo del campo visual. Se ha observado que las personas mayores tienen menor agudeza visual perimetral, y se pierde rápidamente a partir de los 60.

La **percepción de la distancia y la profundidad** se realiza gracias a la visión binocular. Apenas hay estudios sobre la pérdida de visión binocular en personas mayores.

Se ha descubierto que la sensibilidad al **deslumbramiento** crece exponencialmente con la edad, así como el tiempo necesario para recuperar la visión tras el deslumbramiento.

La capacidad de distinguir entre **colores** diferentes también se pierde con la edad. Es más frecuente confundir colores cuando éstos tienen un bajo nivel de luminancia.

Otra capacidad que se pierde con la edad es la de distinguir entre **eventos simultáneos entrelazados**. Por ejemplo, se puede medir esta capacidad al tratar de distinguir si una luz parpadea o no, cuando lo hace a gran frecuencia. O en distinguir si un objeto se mueve o no, cuando lo hace con una gran frecuencia y pequeña amplitud.

La capacidad de **evaluación espacio-temporal** se encarga de predecir el tiempo de llegada de un móvil, tras observar su velocidad durante un corto espacio de tiempo, se ve reducida con la edad, especialmente en mujeres. Esta habilidad es especialmente importante al tomar la decisión de aceptar o no un hueco en el tráfico.

Una habilidad esencial en la conducción es la detección de información interesante en la **visión periférica**, para después centrar la visión sobre el objeto en cuestión. Parece ser que las personas mayores tienen dificultades en rechazar estímulos distrayentes e irrelevantes y observar el estimulo correcto. La situación varía según si se trata de una búsqueda con aprendizaje o no. Es decir, si el sujeto sabe lo que va a buscar y lo que le va a distraer, encontrará antes lo que busca que si es una búsqueda subconsciente.

En el **test UFOV** (*useful field of view*) se mide el campo visual en el que se perciben los estímulos. Dicho campo se reduce si el fondo tiene una gran complejidad, o si el sujeto está pensando en otras cosas al mismo tiempo. Esta reducción del campo visual es más acusada en personas mayores.

Existen tres enfermedades relacionadas con la vista que afectan principalmente a personas mayores, y que disminuyen su capacidad de conducción: son las cataratas, el glaucoma y la degeneración macular.

- El glaucoma es una deficiencia visual provocada por un incremento de la presión del líquido que hay dentro del ojo: el humor acuoso. Este incremento daña las fibras del nervio óptico de manera irreparable.
- La degeneración macular es una deficiencia visual que afecta a la parte central de la retina en personas mayores. Se atribuye a la luz ultravioleta y a déficits alimenticios. Es la segunda causa más importante de ceguera en ancianos, después de la diabetes.
- Cataratas es la pérdida de transparencia del cristalino. El cristalino es una lente transparente que tenemos detrás de la pupila y que nos sirve para enfocar nítidamente los objetos. Casi tres de cada cuatro personas mayores de 75 años padecen de cataratas.

Las siguientes figuras ilustran las consecuencias de sufrir cataratas para un conductor (obtenidas de Alicandri y otros, 1999).

Figura 13-1. Visión de una señal por un conductor sano

Figura 13-2. Visión de una señal por un conductor que sufre cataratas

13.2.2 Cognitivas

Kostyniuk y Shope (1998) revisan cómo las limitaciones mentales de las personas de edad avanzada influyen en su conducción.

La **habilidad de ignorar información irrelevante** disminuye con la edad, así como la capacidad de concentración. También parece que encuentran problemas para reorientar su atención rápidamente hacia un estímulo relevante.

Una posible causa de accidente puede ser no haber realizado una maniobra evasiva a tiempo, quizá debido a la **falta de atención**. Se ha encontrado que esta causa de accidente aumenta linealmente con la edad.

Además de la falta de atención, otro motivo puede ser la **lentitud en la toma de decisiones**. Las personas mayores procesan la información a menor velocidad, por lo que es más probable que no les dé tiempo a analizar todos los estímulos que les llegan, aumentando el tiempo de reacción.

13.2.3 Motoras

Con la edad, disminuye la flexibilidad de las articulaciones y la fortaleza muscular.

En una encuesta realizada por Yee (1985) a conductores de más de 55 años se encontró que el 21% de ellos reconocía tener **problemas para girar el cuello** y observar la parte posterior de su vehículo mientras conducía.

Este mismo texto indica que el 35% de los encuestados admitieron que la artritis les generaba dificultades para la conducción. Esta enfermedad está ampliamente extendida entre la 3ª edad, llegando a afectar al 50% de la población.

Otro estudio de Bulstrode (1987) indica que limitaciones en la amplitud del movimiento del cuello puede reducir la capacidad del conductor para desarrollar tareas básicas como mirar hacia atrás, aparcar, y observar el ángulo muerto.

Isler y otros (1997) midieron la amplitud de movimiento del cuello para conductores de diferentes edades. Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 13-1.

Edad del conductor (años)	Semiángulo de giro del cuello.
< 39	86º
40 - 59	72º
60-69	67º
> 70	59º

Tabla 13-1. Giro de cuello en función de la edad

Los tres conductores más mayores recogidos en este estudio podían girar su cuello menos de 50º, y tenían menos de 20º de visión periférica.

En general, cualquier enfermedad que afecte al aparato locomotor y reduzca las habilidades motrices del afectado, también limitará su capacidad de conducción. Si, además, esta enfermedad produce dolor y molestias, el conductor verá reducida su capacidad de concentración y su tiempo de respuesta. Ejemplos de este tipo de dolencias son: hernias, artritis, dolores de espalda.

13.2.4 Estado de salud

Las personas mayores tienen una mayor tendencia a sufrir **enfermedades** de todo tipo. Existen algunas que pueden afectar a la conducción (R. Morgan y D. King, 2002), como son:

1. Alteran la conciencia:

- Epilepsia
- Diabetes Mellitas
- Síncope Cardiogénico

2. Alteran el control de los movimientos:

- Derrames cerebro-vasculares
- Parkinson
- Problemas de agudeza visual, campo visual y visión nocturna.
- Dolencias visuales (Glaucoma, Cataratas, etc.)
- Dolencias degenerativas de articulaciones (Artritis, etc.)
- Demencia.

Poser (1993) señala que el síndrome de Parkinson tiene un dramático efecto en el tiempo de reacción. Algunos síntomas de esta enfermedad son la rigidez en las articulaciones, y la lentitud e imprecisión de los movimientos. Esto puede hacer que el sujeto sea incapaz de reaccionar a tiempo. Este autor recomienda retirar la licencia de conducción a estos pacientes, al menos hasta que se demuestre que la medicación está mejorando sustancialmente su situación.

A esto hay que añadir otro tipo de dolencias, que, aunque no afectan directamente a la conducción, sí lo hacen los **medicamentos** que las tratan. El médico debe alertar al paciente sobre el tipo de tratamiento que está siguiendo y sus efectos sobre la conducción.

Los conductores mayores no son los únicos que se medican pero tienen mayor probabilidad de conducir bajo el efecto de medicación. Son también más propensos a ser sensibles a los efectos colaterales de los medicamentos como resultado de los cambios propios de la edad en la asimilación y respuesta a los mismos (farmacodinámica). Los efectos de los medicamentos en la conducción han sido relatados en numerosos estudios.

Las drogas que alteran las funciones psicomotoras por sedación u otro mecanismo son prescriptas con más frecuencia en la vejez. En un estudio de la Tenessee Medicaid Cohort, 16.262 personas con edades entre 65 y 84 años fueron acompañadas durante cuatro años y se registraron todos los detalles de cualquier accidente de tránsito en la que ellos se vieron envueltos, obtenidos de los registros policiales. Las conclusiones incrementaron la información sobre los efectos negativos de los benzodiazepínicos en la conducción.

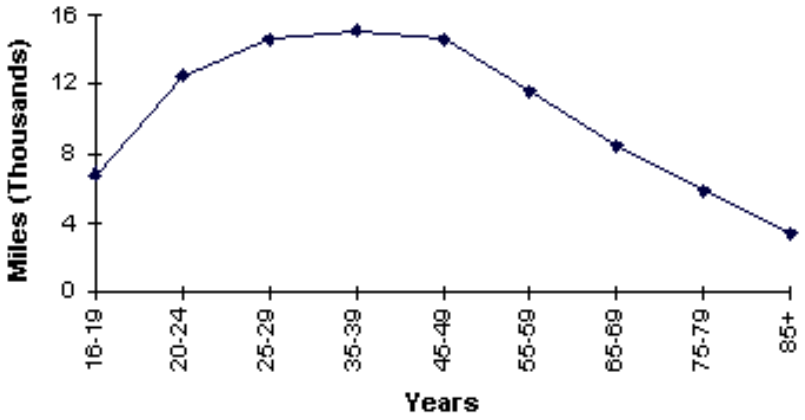
A continuación se listan algunos de los medicamentos más consumidos por los mayores que pueden alterar la conducción: benzodiazepínicos, anti-depresivos, analgésicos con opiáceos, hipoglucémicos, anti-histamínicos.

13.3 Patrones de conducción

13.3.1 Estadísticas de uso del vehículo con la edad

Los conductores mayores tienen unas características concretas que les diferencian de los conductores de edad media.

El texto "Transportation in an Aging Society" (Transportation Research Board, 1988) revisa los datos disponibles sobre la forma de conducir de las personas mayores, en EEUU. Los conductores de 65-74 años recorren aproximadamente la mitad de la distancia anual que recorre un conductor de 35-44 años. A partir de 75 años, esta distancia continúa disminuyendo.



Source: National Highway Traffic Safety Administration, 1995

Figura 13-3. Distancia anual media recorrida, según la edad

Sin embargo, aunque recorren menos distancia, realizan un número de desplazamientos similar. Las personas mayores no realizan desplazamientos para ir al trabajo, pero tienen otros motivos por los que coger el coche. Según Benekohal y otros (1994), los conductores de 66-76 años utilizan su vehículo 5,7 días a la semana. El principal motivo del viaje es realizar la compra, aunque también por ocio, para visitar a algún amigo, o para acudir al médico.

Parece ser que continuamos conduciendo aunque envejezcamos. Entre 1991 y 2001 el número de conductores con licencia en EEUU creció un 32%. El 75% de los varones mayores de 70 años en EEUU continúan conduciendo (Road Information Program, 2003).

Hemos de señalar aquí que estos estudios corresponden a conductores de EEUU, y podemos suponer que habrá ciertas diferencias culturales con respecto a España.

En España, según el censo de conductores a 31/12/2003 (DGT), hay 1706372 conductores mayores de 64 años, lo que corresponde con el 8,41% del total de conductores. En España hay 643016 conductores varones en el intervalo de 65 a 69 años, lo que corresponde con el 66% de la población masculina de esa edad. En la Figura 13-4 se muestra el porcentaje de población con carné de conducir en España, por rangos de edad. Este gráfico es de elaboración propia, a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística (2003) y de la Dirección General de Tráfico (2003).

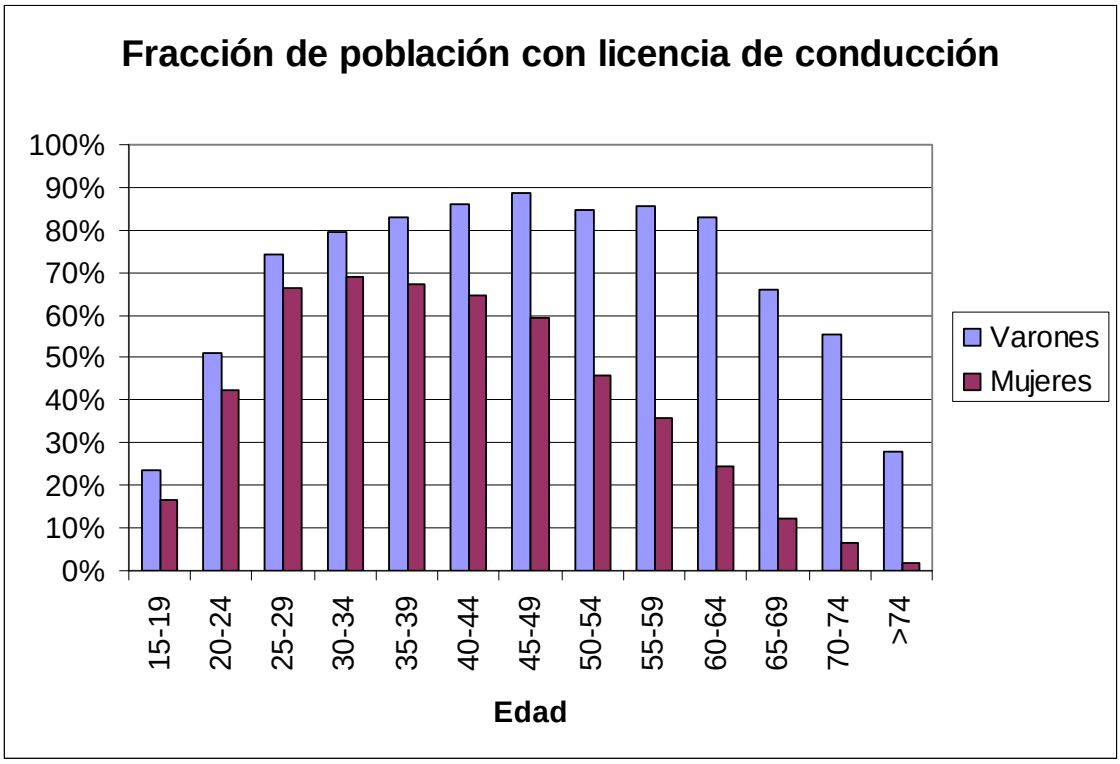


Figura 13-4. Permiso de conducción por edades, en España

13.3.2 Autorregulación

Las personas mayores, cuando tienen que conducir, son conscientes de sus limitaciones, y toman ciertas medidas para mejorar su seguridad.

Diferentes estudios (según comentan Kostyniuk y otros, 1998) han demostrado que los conductores de edad avanzada evitan conducir de noche, así como conducir en las horas de más tráfico, o en condiciones climáticas adversas (nieve, lluvia, niebla).

Chu (1994) indica que estos conductores tienen menos tendencia a utilizar las autopistas, y que, en general, conducen a menor velocidad.

Owsley y otros (1999) comprobaron que los conductores con cataratas conducen más lento que el resto, y prefieren ir acompañados durante la conducción.

Ball y otros (1998) indicaron que algunos conductores mayores modificaron su comportamiento al conocer las dificultades que presentaban durante la conducción. Algunas de estas variaciones en el comportamiento pueden ser: evitar la conducción nocturna, evitar la conducción durante el mal tiempo, evitar carreteras no conocidas, evitar las horas punta, zonas de gran tráfico o grandes autopistas y conducir menores distancias.

Los conductores mayores son mucho más responsables que el resto. Según datos de "Traffic Safety Facts 2003" (NHTSA), de entre todos los conductores involucrados en accidentes, los mayores de 55 años tienen la menor **tasa de alcoholemia** de todos los rangos de edad (Figura 13-5).

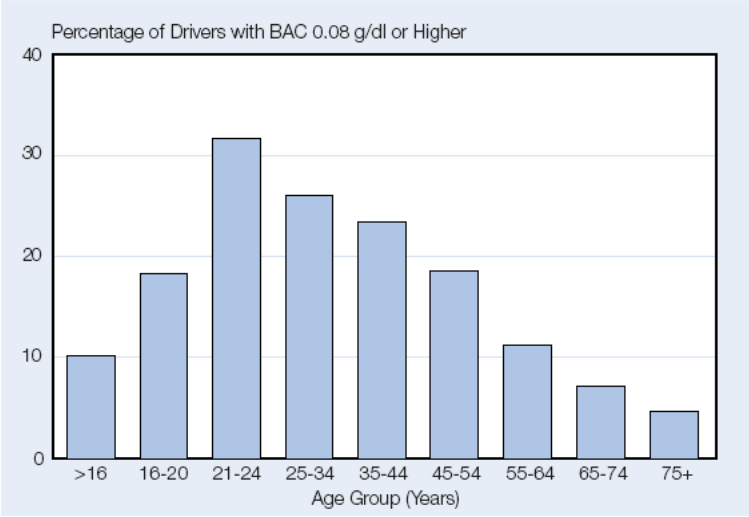


Figura 13-5. Tasas de alcoholemia en conductores que sufrieron un accidente, según la edad, en EEUU

Por otro lado, el 74% de los ocupantes (conductor y pasajeros) de mayor edad llevaba puesto el **cinturón** (en vehículos tipo turismo, en accidentes mortales y no mortales), mientras que para el resto de edades este porcentaje es 61%.

Los conductores mayores aparecen con mucha menos frecuencia en accidentes en los que la causa fue un exceso de velocidad por parte del conductor (Figura 13-6).

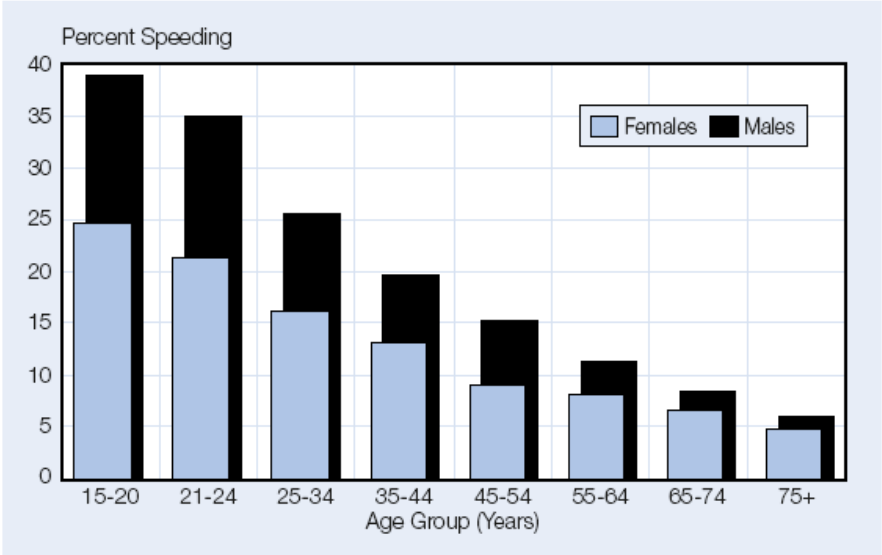


Figura 13-6. Accidentes por exceso de velocidad, según edad del conductor

13.4 Estadísticas de accidentalidad

13.4.1 Datos globales

En "Seguridad Vial en España – Informe 2003" (DGT), se señala que los jóvenes y las personas mayores tienen más probabilidad de sufrir un accidente mortal. En la Figura 13-7 y la Figura 13-8 se muestra el número de accidentes relativo a la fracción de población total existente en España.

Podemos ver que los jóvenes tienen una alta probabilidad de resultar heridos y también de sufrir un accidente mortal. Sin embargo, las personas mayores tienen poca probabilidad de quedar heridos y mucha de resultar fallecidos. Esto es así debido a que las personas de edad avanzada son más frágiles y, ante un mismo accidente, tienen mucha mayor probabilidad de sufrir graves consecuencias que un joven.

Según datos correspondientes a España, recopilados por la DGT (2004), las personas mayores se ven implicadas en accidentes sufriendo lesiones más graves que los jóvenes. De las 10370 personas de más de 64 años que fueron víctimas de accidentes, el 7% resultaron fallecidas y el 22% heridas graves, mientras que para el total de la población estos porcentajes fueron 3% y 15% respectivamente.

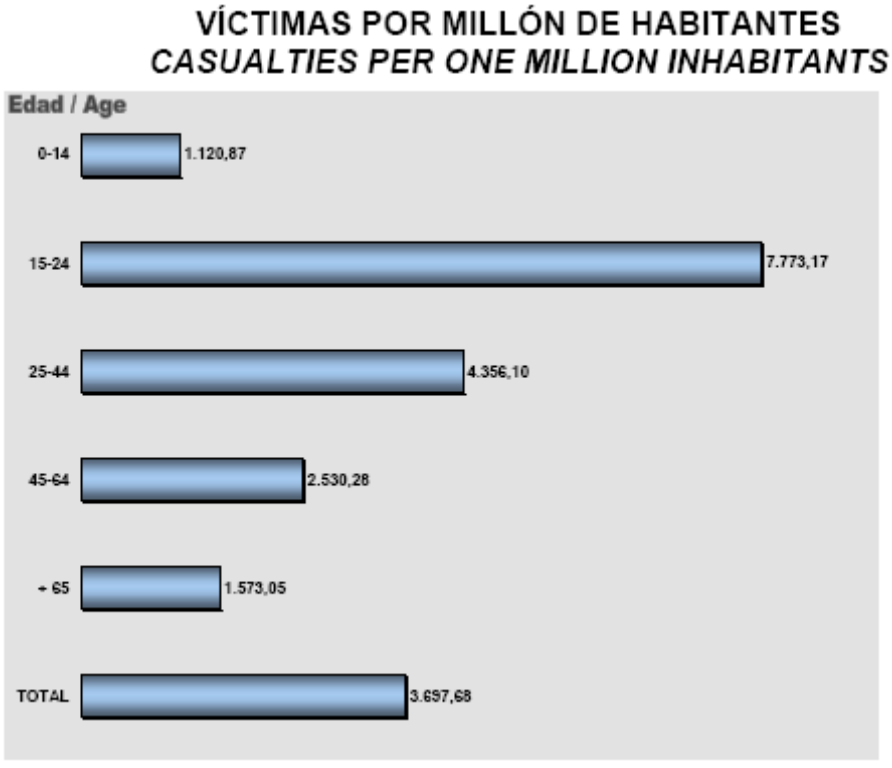


Figura 13-7. Heridos en accidentes de tráfico, según la edad

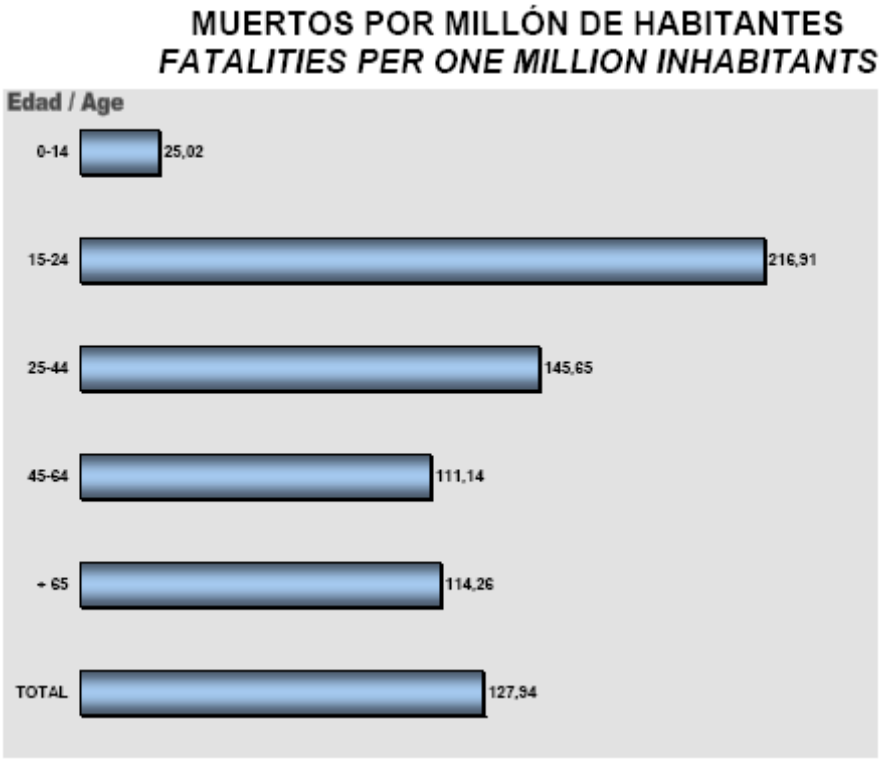


Figura 13-8. Víctimas mortales en accidentes de tráfico, según la edad

En la Figura 13-9 se muestra el índice de gravedad correspondiente a los datos de accidentalidad recopilados por la DGT en 2003. Este índice se calcula con el total de víctimas mortales en accidentes de circulación, y el total de víctimas (mortales, heridos graves y heridos leves). Podemos observar que, entre el total de víctimas, hay una mayor proporción de víctimas mortales entre personas de edad avanzada.

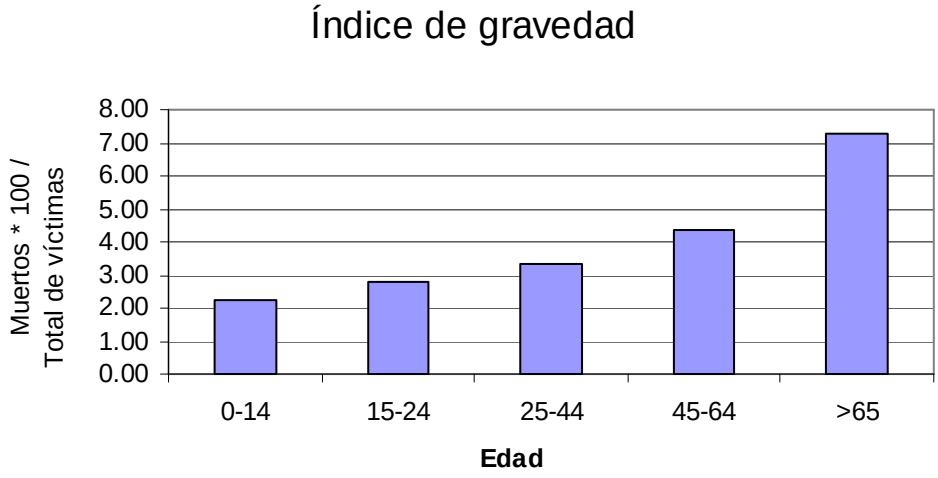


Figura 13-9. Índice de gravedad según la edad

Según datos recopilados por la National Highway Traffic Safety Administration, en EEUU en 1996, las **tasas de siniestralidad** por 100 millones de millas recorridas en el vehículo son las que se muestran en la Figura 13-10.

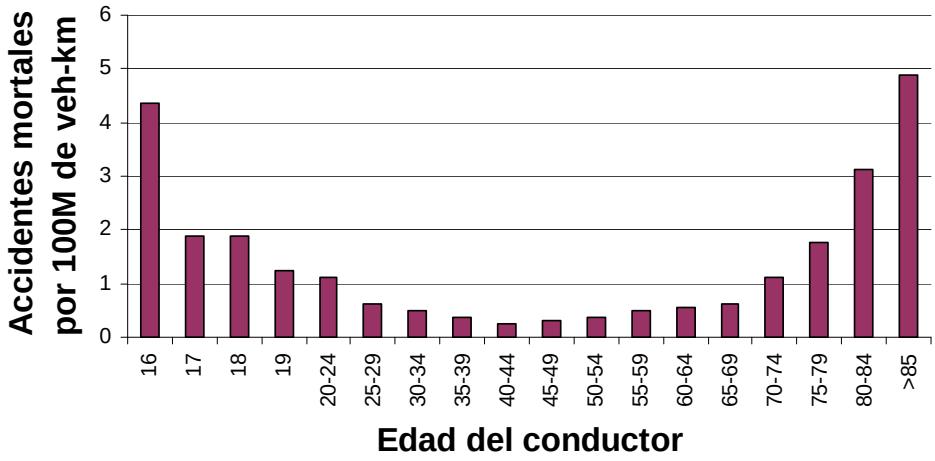


Figura 13-10. Tasas de accidentes según la edad

En esta figura podemos ver que los conductores de 70-74 años tienen 3 veces más probabilidad de tener un accidente que los de 40-44 años, para la misma distancia recorrida en su vehículo. Estas tasas aumentan rápidamente con la edad, a partir de los 65 años.

También puede verse que los conductores jóvenes tienen tasas de accidentalidad similares a los mayores, pero por causas bien distintas.

13.4.2 Intersecciones de carretera

Un estudio realizado en EEUU por Hauer (1988) recopilando información de las bases de datos disponibles, presenta los siguientes demoledores datos: las personas de edad avanzada tienen mucha mayor probabilidad de sufrir un **accidente en intersecciones** que el resto.

La Figura 13-11 muestra, del total de accidentes para cada rango de edad, qué porción ocurrieron en intersecciones. A la izquierda, los correspondientes a conductores, y a la derecha, como peatones.

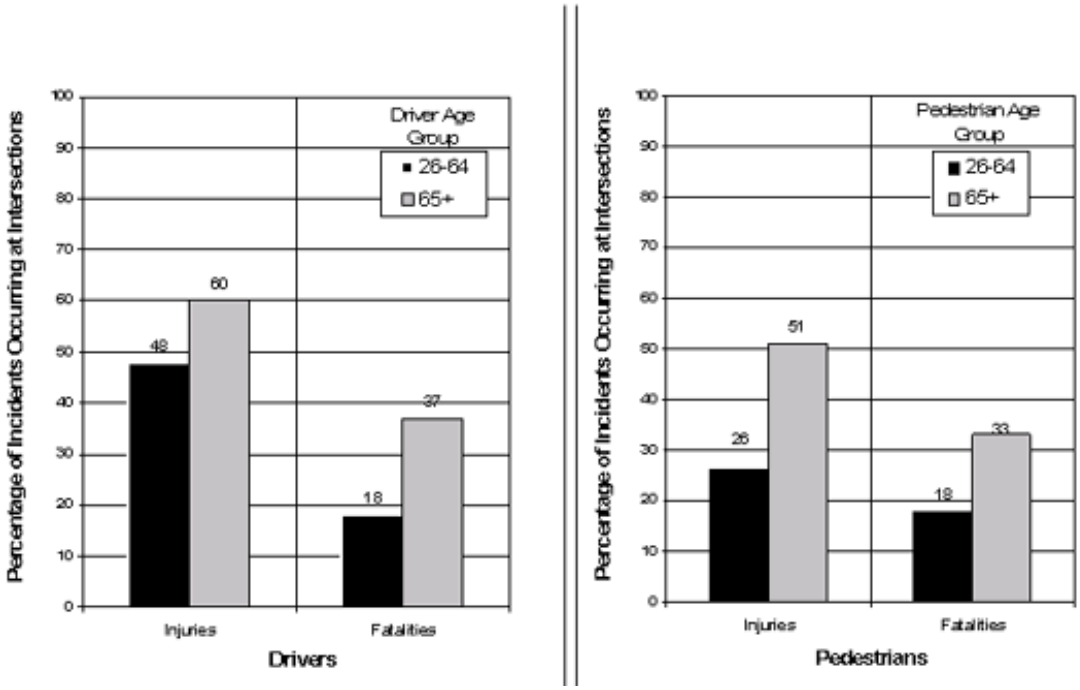


Figura 13-11. Accidentes de personas mayores en intersecciones

Según datos de NHTSA (2003), en accidentes mortales en los que hay dos vehículos involucrados, es 2 veces más probable que el vehículo golpeado sea el conducido por la persona mayor, y el que golpea sea el del conductor joven. De estos accidentes, el 44% ocurrieron en cruces, cuando ambos circulaban sin cambiar de dirección; mientras que el 27% ocurrieron cuando el conductor mayor intentaba realizar un giro a izquierda. Estos datos parecen indicar que estos conductores tienen problemas para circular por las intersecciones, que evalúan mal el hueco, o bien no ven al conductor que viene con preferencia, inician la maniobra, y al conductor joven no le da tiempo a evitar el golpe.

El TRB (1988) afirma que la mayoría de accidentes que envuelven a conductores mayores ocurren en intersecciones, durante los cambios de carril y en maniobras de giro.

13.5 Soluciones al problema

13.5.1 Introducción

El problema de la conducción de las personas mayores es muy complejo y para solucionarlo hay que plantear una **estrategia global**, integral, que cubra todos los frentes posibles.

Es necesaria una adecuada política de **renovación de licencias para conductores**. Sólo un examen médico exhaustivo permitirá identificar aquellos conductores con serias limitaciones, que supongan un riesgo público, y a los que habría que retirar el permiso de circulación.

Para otros conductores con limitaciones de menor gravedad, son necesarios **programas de formación** para que el propio conductor sea consciente de sus limitaciones y adecue su conducción a su nueva situación. En cualquier caso, las estadísticas parecen indicar que las personas mayores son conductores bastante responsables y precavidos.

Con el fin de evitar en lo posible que estas personas tengan que conducir, es preciso incentivar el **transporte público**.

En el **diseño de los vehículos**, existen numerosas mejoras que pueden facilitar la conducción para todo tipo de conductores, pero que son especialmente efectivas con conductores mayores. En concreto, los dispositivos de ayuda a la conducción pueden complementar las reducidas capacidades de una persona de edad avanzada, permitiéndole conducir de manera similar a una joven.

Finalmente, el **diseño de la infraestructura** viaria debe realizarse teniendo en cuenta todo tipo de conductores, y, en especial, aquellos de capacidades más limitadas.

Potts y otros (2003) señalan diversas actuaciones que el Transportation Research Board (EEUU) considera como prioritarias, y que pertenecen a todos los ámbitos de actuación posibles.

13.5.2 El control médico

Waller (1993) opina que cabe la discusión de si conducir es un derecho o un privilegio. Si se asume que es un derecho, todos los conductores deben ser capaces de conducir por las carreteras sin sufrir ningún peligro, así que el diseño se debe enfocar a aquellos conductores con menores capacidades tanto físicas como mentales. Si por el contrario se considera como un privilegio, se les debería suprimir la licencia de conducción

a aquellos sujetos que no tengan las capacidades requeridas para no suponer un peligro en las infraestructuras actuales.

Lo más razonable es adoptar un pensamiento intermedio, mostrando a los conductores impedidos sus limitaciones para que realicen una conducción acorde a ello, mientras se hacen esfuerzos por conseguir que las infraestructuras actuales no resulten peligrosas para ninguna población de usuarios. Según Morgan y King (2002), es importante "proteger el derecho de conducir del individuo mientras que tenga capacidad para hacerlo".

13.5.3 Diseño de carreteras

Tiempo de percepción-reacción

Una variable fundamental en el diseño de carreteras es el tiempo de percepción-reacción. Se utiliza en multitud de cálculos. Parece ser que los actuales modelos para el **tiempo de percepción-reacción** del conductor podrían no ser adecuados para personas mayores (TRB, 1988; Bruff y Evans, 1998).

El tiempo de percepción-reacción incluye tres fases:

- Percepción del estímulo, generalmente, visual;
- Proceso mental de la información;
- Ejecución física de la respuesta sobre el vehículo.

Hemos visto cómo las personas ancianas pueden tener problemas en las tres fases.

Diseño de intersecciones

Se ha demostrado que las personas mayores están más frecuentemente involucradas en accidentes en intersecciones, bien como conductores o como peatones. Por lo tanto, un mejor diseño de las intersecciones es recomendable.

En este sentido, una variable muy importante es el **hueco crítico**, pues define la distancia de visibilidad para intersecciones. Una vez más, algunos estudios parecen indicar que estos conductores requieren de mayores huecos para incorporarse o cruzar una vía de mayor preferencia.

En cuanto a la **oblicuidad**, el texto "Highway Design Handbook For Older Drivers And Pedestrians" (Staplin y otros, 2001) recomienda utilizar intersecciones en ángulo recto. Las intersecciones oblicuas obligan al conductor a realizar movimientos de cuello para observar su ángulo muerto, lo cual puede ser muy dificultoso para una persona mayor. Bruff y Evans (1998) recomiendan limitar la oblicuidad a 75º, y diseñar intersecciones canalizadas allí donde sea posible.

Desde el punto de visto del **peatón**, una intersección oblicua supone una mayor longitud a cruzar, un mayor tiempo de exposición al tráfico, y, por tanto, una mayor probabilidad de sufrir un atropello.

Staplin y otros (1997) realizaron un estudio de campo sobre el uso del retrovisor en intersecciones oblicuas. Encuestaron a voluntarios que realizaron un circuito controlado. Los conductores mayores indicaron que el espejo retrovisor lateral sirve de muy poco en este tipo de intersecciones, y que se ven obligados a girar el cuello, aunque ello les sea muy dificultoso.

Señalización

Para facilitar la conducción con baja visibilidad, al tiempo que ayudar a los conductores con limitaciones visuales, es preciso utilizar **señalización de alta visibilidad**. Se trata de señalización de alto contraste, con altos niveles de retrorreflectancia, de gran tamaño, y con un adecuado mantenimiento para que estén siempre limpias. Esto afecta tanto a la señalización vertical como a la horizontal.

Por otro lado, resulta de interés introducir nuevos tipos de señalización, con símbolos fácilmente entendibles, con la intención de que sirvan de ayuda a la circulación, en las circunstancias que los conductores mayores han señalado como más complejas (Staplin y otros, 2001).

13.6 Conclusión

La población de los países desarrollados está envejeciendo cada vez más. Hoy día se hace más patente la necesidad de garantizar la movilidad de las personas mayores, como aspecto fundamental en la calidad de vida.

Sin embargo, hay ciertas capacidades (visuales, cognitivas y motoras) que se van deteriorando con la edad, y esto puede dificultar mucho la tarea de la conducción. Analizando las estadísticas de accidentalidad relativas a las personas de edad avanzada, vemos que estos conductores están en riesgo.

Resulta entonces necesario resolver el problema. Se han identificado diversas actuaciones, dentro del diseño de carreteras, que pueden facilitar la circulación de las personas mayores. Entre ellas, por su interés con este proyecto, se destaca la recomendación de evitar intersecciones de diseño oblicuo.

14 Comportamiento del conductor

14.1 La tarea de la conducción

Según Mehmood y otros (2003), el comportamiento del conductor se divide en dos grandes tareas: control de la velocidad, y control de la dirección.

El **control de la velocidad** incluye las decisiones tomadas para obtener una velocidad deseada, en relación con la velocidad permitida. También la adopción de una velocidad adecuada al entorno, a la vía, y al resto de vehículos de la misma. Este control se ejecuta mediante el uso de los pedales.

El **control de la dirección** incluye las decisiones tomadas para conseguir una trayectoria. El conductor intentará que su trayectoria discurra centrada en el carril. Pero también decidirá cambios de carril en determinadas situaciones, así como giros y cruces. El control de la dirección también engloba la tarea de elegir el camino más adecuado para llegar al destino. Este control se ejecuta con la actuación sobre el volante.

14.2 Tiempo de percepción-reacción

14.2.1 Definición

El **tiempo de percepción-reacción** se define como el tiempo que transcurre desde que un obstáculo o peligro indefinido aparece en el campo visual del conductor, hasta que éste ejecuta la decisión correspondiente.

Durante ese tiempo, hay una serie de procesos que se tienen que dar lugar. Estos procesos no suponen una secuencia inalterable, sino más bien una secuencia ideal de acontecimientos.

En primer lugar, el conductor, que está mirando hacia otro lado, percibe algo en la visión periférica, que hace que el subconsciente se ponga alerta. Como resultado de esa alerta, la mirada del conductor se dirige hacia el punto en cuestión. Tras un tiempo de acomodación y enfoque de la mirada, el objeto es detectado e identificado. Se produce en ese momento un proceso mental de evaluación del riesgo que supone dicho objeto. Si es insignificante, la mirada del conductor saltará hacia otro punto. Si dicho objeto entraña un riesgo o se opone a la actual trayectoria del vehículo, el conductor debe tomar una decisión. Después de tomar la decisión adecuada con la que hacer frente al estímulo (frenar, cambiar de dirección, accionar la luz intermitente, etc.) el conductor debe llevarla a cabo. En el momento en que el conductor empieza a actuar sobre su vehículo para acomodarse a la situación que ha percibido, el tiempo de percepción-reacción termina. No obstante, el conductor continúa observando su entorno, y evaluando si las medidas adoptadas son acertadas, o bien es necesario corregirlas y adoptar otras nuevas.

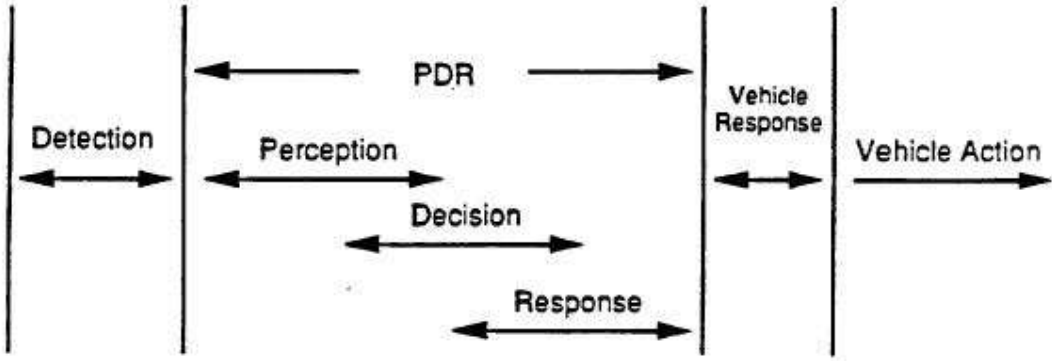
Tijerina y otros (1994) señalan que el proceso visual del conductor implica:

- Detección del objeto: el conductor se da cuenta de que hay algo.
- Observación: el conductor analiza lo que ve.
- Identificación: el conductor reconoce el objeto.

Al proceso conjunto de estas tres fases se denomina a veces como **adquisición de información**. Dicho proceso es clave para la posterior toma de decisión por el conductor (por ejemplo, no hacer nada, mover el pie sobre el freno, actuar sobre el volante, etc.).

Finalmente, hay una fase de **ejecución de la decisión**, en la que la respuesta se aplica sobre el vehículo.

Este proceso puede esquematizarse como se muestra en la Figura 14-1:



PDR means Perception-Decision-Response.

Detection involves registering that something is present.

Perception involves target recognition and identification. It begins after detection is affected by the nature of the stimulus and driver expectancy.

Decision is the development and evaluation of alternative responses.

Response involves the driver's inputs to the vehicle controls once a decision is made.

Vehicle Response is the time lag between driver response to controls and the initiation of vehicle action.

Vehicle Action is affected by vehicle characteristics such as steering sensitivity, condition of brakes, pavement characteristics, tire conditions, and vehicle speed.

Figura 14-1. Esquema del proceso de percepción-reacción

En los últimos años, se están realizando algunos esfuerzos por separar la componente tiempo de percepción del tiempo de reacción. Al distinguir entre estas dos fases, seríamos capaces de dar más precisión en la estimación de la variable global *tiempo de percepción-reacción*, o bien de explicar la gran variabilidad que presenta.

El **tiempo de percepción** podría definirse como el tiempo necesario para que el conductor detecte la presencia del objeto, obstáculo, o condición, que le obliga a tomar medidas, durante el **tiempo de reacción**. En el caso de la maniobra de frenada de emergencia, que es el caso clásico, se trata de la presencia de un obstáculo insalvable en la calzada, que obliga a realizar una frenada brusca.

Pero existen otros casos. El vehículo precedente puede realizar un cambio brusco en su velocidad, digamos, una frenada. En ese caso la circunstancia que el conductor debe ser capaz de detectar es el cambio en la velocidad relativa entre los vehículos. El vehículo precedente no supone un obstáculo nuevo en la calzada, pues ya se había detectado con anterioridad. Lo nuevo es ese cambio de velocidad. Si se produce por una aplicación del freno, puede que la circunstancia que el conductor detecte sean los pilotos traseros de frenada. La respuesta es, también en este caso, frenar.

Resulta obvio que ante estímulos diferentes, el tiempo de percepción será diferente. Hay estímulos más fácilmente detectables que otros.

14.2.2 Factores

El tiempo de percepción-reacción varía mucho de una situación a otra. Varía según el conductor, su edad, su condición física, su edad, su cansancio, su nivel de concentración, sus motivaciones personales. También varía, dentro de un mismo conductor, según la luminosidad del entorno, los colores, el contraste visual del objeto respecto del fondo, el movimiento que tenga, la presencia de intermitencias, su altura, etc. Es, por tanto, un parámetro tremendamente variable, que puede adoptar muy diversos valores.

Una cuestión importante en el fenómeno de la percepción es la **porción de un objeto que es necesario visualizar** para que el conductor sea capaz de reconocerlo, según señalan Fambro y otros (1997). La norma sueca indica que es necesario ver 1 minuto de arco para detectar un objeto. Para distinguirlo, depende de si el objeto es común, del contraste con el fondo, de la luminosidad, etc. Para reconocerlo como un peligro, hay circunstancias psicológicas muy complejas. Una de las variables más involucradas es la altura del objeto. Alturas pequeñas no se detectan como un verdadero peligro, y no llevan a producirse maniobras evasivas.

Los conductores son capaces de detectar objetos de 150 mm a la distancia de parada a 90 km/h, si tienen suficiente contraste. Con menos contraste, se necesitan 300 mm. Sin embargo, no son capaces de reconocer el tipo de objeto. Por la noche, no obstante, una gran parte de la población es incapaz ni de detectar ni de reconocer objetos peligrosos a la distancia de parada, circulando a 90 km/h. La única salvedad es que los objetos sean retroreflectantes, o estén iluminados, en cuyo caso sí que se detectan.

Rasmussen (1993) adopta en su estudio que los conductores necesitan ver el 50% de un vehículo, durante 1,0 segundo, para identificarlo y tomar una decisión sobre él.

Tijerina y otros (1994) realizan una identificación de los diferentes **factores que afectan a la buena percepción** por parte del conductor. Estos factores se enumeran a continuación:

- Contraste entre el objeto y el fondo, que puede determinarse como la relación de luminancias entre ambos.
- Tamaño visual del objeto, determinado como el ángulo visual según el cual el objeto es visualizado.
- Adaptación, por parte del ojo del conductor, a diferentes niveles de luminosidad.
- Resistencia del conductor al deslumbramiento.
- Complejidad de la escena, o ruido visual ambiental.
- Color el objeto.

- Forma del objeto.
- Textura del objeto, tipo de superficie, nivel de reflexión.
- Nivel de atención por parte del conductor.
- Circunstancias psicológicas del conductor, como la edad, familiaridad con el entorno, experiencia en ese tipo de situaciones, fatiga, ansiedad.
- Movimiento del objeto, respecto del observador.
- Familiaridad con el objeto.
- Calidad del aire, medio por el que viaja la información visual. La presencia de niebla, polvo y otras partículas pueden entorpecer la visión.
- Limpieza del parabrisas. El propio cristal del vehículo puede dificultar la percepción a su través.

En cuanto a la **psicología del conductor**, Ahmed (1999) indica que el tiempo de percepción-reacción depende de la fatiga del conductor, de su edad, estado de alerta. A su vez, el estado de alerta del conductor está condicionado por el entorno. Se sabe que en situaciones de mala visibilidad el conductor permanece más atento, compensando el aumento de ese tiempo por la mala visibilidad. Así mismo, los conductores también permanecen en estado de alerta ante complejos trazados de la vía, intersecciones, altas velocidades, aumento de la intensidad de tráfico, mal tiempo, …

El **tiempo de decisión**, en el que el conductor adopta la alternativa más adecuada, también varía enormemente de unas situaciones a otras. Si la decisión es sencilla, por ejemplo, frenar, puede que ese tiempo sea muy pequeño. Si la decisión es más compleja, como, por ejemplo, elegir una ruta alternativa pues la ruta planeada inicialmente está cortada por obras, el tiempo necesario puede elevarse enormemente.

Esta es la razón por la que las señales indicativas de dirección, que informan a los conductores sobre el destino de las diferentes vías que se cruzan en una intersección, se coloquen con suficiente antelación. Algunos estudios muestran que este tiempo puede alcanzar los 14 s, en carreteras desconocidas para el conductor. En ese tiempo el conductor decide cuál es la carretera que le lleva a su destino, por el camino más adecuado, y se prepara para realizar las maniobras necesarias para tomarla.

14.2.3 Valores para el diseño

Para el diseño de carreteras, es necesario tomar un valor que quede del lado de la seguridad en la mayor parte de los casos posibles. Se toman valores correspondientes al percentil 90% o 95%. En España se adopta un **tiempo de percepción-reacción de 2 s**, pero otras normativas eligen otros valores. La AASHTO (EEUU), recomienda el uso de 2,5 s para este parámetro.

14.2.4 Variabilidad estadística

El tiempo de percepción-reacción de los conductores puede considerarse una función aleatoria, que depende de diversos factores, según se ha descrito anteriormente. Cada conductor, en cada situación concreta, presentará un tiempo de percepción-reacción distinto. Pero unos valores serán más probables que otros.

Muchos autores, como Subramanian (1996), Johansson y Rumer (1971) y Lerner et al (1995), coinciden en que la distribución estadística del tiempo de percepción-reacción es asimétrica hacia la izquierda, **de tipo log-normal**. Esto implica que la probabilidad de

que un conductor presente un valor más bajo de los normal en este tiempo es mayor que la probabilidad de que presente un valor mayor que el normal.

Matemáticamente, podría describirse así (Ahmed, 1999):

$$f(\tau_n) = \begin{cases} \dfrac{1}{\Phi\left(\dfrac{\ln(\tau_{max}) - \mu_\tau}{\sigma_\tau}\right)\tau_n \sigma_\tau \sqrt{2\pi}} \, e^{-\frac{1}{2}\left(\dfrac{\ln(\tau_n) - \mu_\tau}{\sigma_\tau}\right)^2} & \text{if } 0 < \tau_n \leq \tau_{max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

donde:

τ_n es el tiempo de reacción en una situación n (con un conductor y unas condiciones determinadas),

μ_τ es la media de la distribución de $ln(\tau_n)$,

σ_τ es la desviación típica de la distribución de $ln(\tau_n)$,

τ_{max} es el límite superior de la distribución de τ_n (un parámetro a ser estimado), y

Φ es la función de distribución acumulada para la distribución normal estándar (media 0 y desviación típica 1).

Podemos representar matemáticamente cómo la media de la distribución μ_τ depende de una serie de variables explicativas (luminosidad, contraste con el fondo, edad del conductor, etc.) con un producto vectorial:

$$\mu_\tau = X_n^\tau \cdot \beta^\tau$$

donde:

X_n^τ es un vector de las variables explicativas,

β^τ son los coeficientes (a determinar) del modelo lineal.

A continuación se incluyen los **valores obtenidos experimentalmente** por diferentes autores, en diferentes estudios, sobre los parámetros de esta distribución (Tabla 14-1).

Fuente	Tamaño de muestra	Estímulo	Mediana (s)	Media (s)	Desviación típica (s)
Iftekhar (1999)	402	Cambio de velocidad	1.31	1.34	0.31
Johansson y Rumer (1971)	321	Sonido	0.89	1.01	0.37
Lerner y otros (1995)	56	Objeto inesperado	1.44	1.51	0.39

Tabla 14-1. Tiempo de percepción-reacción obtenido experimentalmente

La mediana, la media y la desviación típica se presentan en segundos. El tamaño de muestra es el número de situaciones examinadas, con diferentes individuos. El estímulo en el estudio de Ahmed (1999) es un cambio de velocidad en el vehículo precedente. En este texto el autor trata de obtener un modelo que explique el proceso seguido por los

conductores al circular detrás de otro vehículo. El estímulo aplicable en ese caso es que el vehículo precedente cambie su velocidad de manera apreciable. En el texto de Johansson y Rumer (1971) a los conductores se les pedía que frenasen al oír una señal acústica. Lerner y otros (1995) realizaron un estudio en el que se obligaba a los conductores a circular por un circuito cerrado, en el que iban apareciendo objetos inesperados sobre la vía. Al conductor se le sometía a situaciones de riesgo controlado (un bidón aparecía rodando sobre la vía), y se midieron los tiempos necesarios para realizar una maniobra evasiva.

Existen ciertas diferencias en los valores mostrados en la tabla anterior, que son debidas a diversas razones. Por un lado, la capacidad de aceleración y frenada de los vehículos, ha cambiado mucho a lo largo de los años, y estas investigaciones tienen distintas fechas de publicación. Por otro lado, están realizadas en diferentes lugares, con diferente población, que tiene unos hábitos de conducción característicos. Además, el estímulo que provoca la maniobra evasiva es diferente en todos los casos. Por último, la metodología experimental para recoger esos datos varía de un estudio a otro.

14.3 Comportamiento del conductor al decidir su velocidad

Existen modelos que tratan de simular las decisiones tomadas por un conductor, cuando circula por una carretera, para elegir la velocidad más apropiada. Por un lado se diferencian los modelos orientados a la elección de la velocidad en circulación libre, cuando el camino está despejado y no le preceden otros vehículos. Por otro lado, tenemos los modelos en los que el conductor va siguiendo a otro: circulación condicionada.

Estos modelos son necesarios para describir el comportamiento del conductor conforme se aproxima a una intersección. En ese tramo de aproximación, puede que circule detrás de otro vehículo o no. Lo que nos interesa para esta investigación es poder explicar la velocidad con la que llegan los conductores a la incorporación. Esta velocidad va a depender (principalmente) del trazado de la vía en la zona de aproximación; de la velocidad del vehículo precedente, si lo hay; y de la señalización (limitaciones legales).

14.3.1 Modelos de circulación libre

Cuando el conductor tiene ante sí la carretera vacía, sin vehículos con los que interaccionar, lo único que hace es mantener una "velocidad deseada" (Ahmed, 1999). Para llegar hasta ella, usará valores confortables de aceleración y deceleración.

Para explicar este comportamiento se han desarrollado modelos que se denominan "de flujo libre" (*free-flow regimes*).

La **velocidad deseada** en cada momento dependerá del trazado de la carretera, las limitaciones legales, las limitaciones del propio vehículo, la visibilidad disponible, el tipo de conductor, el estado anímico del mismo, el motivo del viaje, etc. Los valores de aceleración y deceleración considerados como confortables también variarán de unas circunstancias a otras.

Algunos modelos consideran un valor medio de estos parámetros, que es el mismo para todos los conductores de un mismo tipo de vehículos, que varía en función del trazado de la vía. A ese valor medio le suman un factor que recoge la variabilidad estadística, las diferencias entre conductores. Matemáticamente, podría escribirse así:

$$v_{desired}(n,t) = v_{base} + \varepsilon(n,t)$$

$v_{desired}(n,t)$ es la velocidad deseada, para el conductor *n* en el instante *t*.

v_{base} es la velocidad media adoptada por los conductores de un tipo de vehículos, (ligeros o pesados), en ese tramo de vía.

$\varepsilon(n,t)$ es un término aleatorio, de distribución normal y media cero, que varía de un conductor a otro, y de un instante del tiempo a otro.

La aceleración necesaria para alcanzar esa velocidad deseada puede expresarse de la siguiente manera:

$$a_n(t) = \lambda \cdot \left[V_n^{desired}(t-\tau_n) - V_n(t-\tau_n)\right] + \varepsilon_n(t)$$

Donde:

a_n(t) es la aceleración adoptada por el conductor *n* en el instante *t*.

λ es el factor de proporcionalidad.

$V_n^{desired}$ es la velocidad deseada por el conductor *n*.

V_n es la velocidad real que tiene el conductor *n*.

τ_n es el tiempo de reacción del conductor *n*.

ε_n es un factor aleatorio, correspondiente al conductor *n*.

14.3.2 Modelos de circulación condicionada

El principal objetivo de los modelos de circulación condicionada es predecir la velocidad del vehículo, así como el espaciamiento adoptado, respecto al vehículo precedente. Estos modelos normalmente consideran una cadena de vehículos circulando por un único carril (los cambios de carril no se consideran, pues es el campo de análisis de otros modelos).

Los modelos de circulación condicionada se denominan *car-following models* en inglés. Tienen una gran aplicación en microsimulación.

En los últimos 50 años, se han propuesto muchos de estos modelos. Un análisis de todos ellos nos lleva a clasificarlos en cuatro tipos: modelos estímulo-respuesta, modelos de distancia de seguridad, modelos psico-físicos, modelos de lógica difusa.

Modelos estímulo-respuesta

Los modelos estímulo respuesta son los primeros que aparecieron. En ellos, el comportamiento del conductor perseguidor está condicionado únicamente por la **posición y velocidad del conductor precedente**. Ante un cambio en la velocidad o posición del vehículo que va delante, el conductor que le sigue adopta una respuesta.

$$respuesta(t) = factor \cdot estímulo(t-\tau)$$

La respuesta, en el instante *t*, será un cambio en la velocidad (una aceleración).

El factor es un coeficiente, que puede ser constante, o bien ser también una función del tiempo.

El estímulo que origina la respuesta es un cambio en la velocidad (o un cambio en la distancia entre vehículos), ocurrido en un instante anterior. El tiempo τ es el desfase entre el estímulo y la respuesta. En ese sentido, es considerado como un tiempo de percepción-reacción.

El primer texto en el que aparecen es Chandler y otros (1958). El modelo es el más sencillo posible:

$$a_F(t+\tau) = \alpha \cdot [V_{L2}(t) - V_F(t)]$$

a_F es la aceleración del vehículo perseguidor.

V_{L2} es la velocidad del vehículo precedente.

V_F es la velocidad del vehículo perseguidor. El término dentro del corchete es, entonces, la velocidad relativa entre los dos vehículos.

α es el factor de proporción.

Otros modelos más complejos incluyen factores como la distancia relativa entre los vehículos: $X_{L2} - X_F$. Si hay mucha distancia, la reacción del vehículo perseguidor será menor, o tardará más en producirse.

Por otro lado, otros modelos sugieren que el conductor no sólo toma en consideración al vehículo que tiene delante, sino a todos los que le preceden. Para simplificar, se toma en cuenta la velocidad (V_{L1} y V_{L2}) y posición (X_{L1} y X_{L2}) de dos vehículos que preceden al vehículo considerado.

Otro de los factores que algunos modelos incluyen es la longitud de los vehículos implicados: L_F, L_{L1}, L_{L2}.

A continuación se muestra una tabla resumen de los modelos más usuales, según diversos autores (Tabla 14-2).

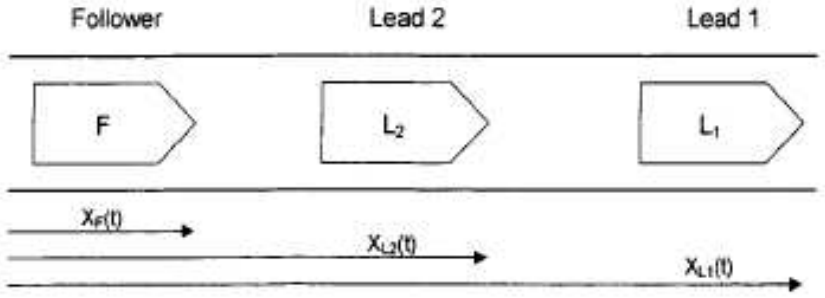
Table 1. Selected Car-Following Model Algorithms

Source	Corresponding far-following model
Chandler et al. (1958)	$a_F(t+\Delta t)=\alpha[V_{L2}(t)-V_F(t)]$
Gazis et al. (1959,1961)	$a_F(t+\Delta t)=\alpha\left[\frac{1}{X_{L2}(t)-X_F(t)}\right][V_{L2}(t)-V_F(t)]$
Edie (1961)	$a_F(t+\Delta t)=\alpha\left[\frac{V_F(t)}{[X_{L2}(t)-X_F(t)]^2}\right][V_{L2}(t)-V_F(t)]$
Newell (1961)	$a_F(t+\Delta t)=G_n[X_{L2}(t)-X_F(t)]$
Herman and Rothery (1962)	$a_F(t+\Delta t)=\alpha\left[\frac{[V_F(t)]^m}{[X_{L2}(t)-X_F(t)]^l}\right][V_{L2}(t)-V_F(t)]$
Bierley (1963)	$a_F(t+\Delta t)=\alpha[V_{L2}(t)-V_F(t)]+\beta[X_{L2}(t)-X_F(t)]$
Fox and Lehman (1967)	$a_F(t+\Delta t)=\alpha V_F(t)\left[\frac{W_1[V_{L2}(t)-V_F(t)]}{[X_{L2}(t)-X_F(t)]^2}+\frac{W_2[V_{L1}(t)-V_F(t)]}{[X_{L1}(t)-X_F(t)]^2}\right]$
Bexelius (1968)	$a_F(t+\Delta t)=\alpha[V_{L2}(t)-V_F(t)]+\beta[V_{L1}(t)-V_F(t)]$
Rockwell and Treiterer (1968)	$a_F(t+\Delta t)=\alpha[V_{L2}(t)-V_F(t)]+\beta a_{L2}(t)$
NETSIM (Wicks and Andrews 1980)	$a_F(t+\Delta t)=\frac{2[X_{L2}(t+\Delta t)-X_F(t)-L-V_F(t)(1+c)]d_F(t)+\frac{V_L(t)^2 d_F(t)}{d_L(t)}-V_F(t)^2}{d_F(t)(2c+1)+2V_F(t)}$
FRESIM (Bullen 1982)	$a_F(t+\Delta t)=\frac{2[X_L(t+\Delta t)-X_F(t)-L-10-V_F(t)(k+\Delta t)-bk(V_L(t+\Delta t)-V_F(t))^2]}{(\Delta t)^2+2k\Delta t}$
INTELISIM (Aycin and Benekohal 1998,2001)	$a_F(t+\Delta t)=\frac{X_L(t+c)-X_F(t+c)-V_L(t)t_p}{0.166\Delta t^2}-\frac{(0.666[V_F(t+c)-V_L(t+c)]+a_L(t)t_p)\Delta t}{0.166\Delta t^2}+a_L(t+c)$

Note: $a_F(t+\Delta t)$ = acceleration rate of following vehicle driver at time $t+\Delta t$; $a_{L2}(t)$ = acceleration rate of lead vehicle 2 driver at time t; c = driver reaction time; k = driver sensitivity factor; L = length of vehicle L_2; $V_F(t)$, $V_{L1}(t)$, $V_{L2}(t)$ = speed of following, lead vehicle 1 and lead vehicle 2 at time t; $X_F(t)$, $X_{L1}(t)$, $X_{L_1}(t)$ = position of following, lead vehicle 1 and lead vehicle 2 at time t; t = current simulation time (s); Δt = simulation time step duration (s); G_n = empirical relationship between velocity and headway for acceleration/deceleration; and $\alpha, \beta, b, m, l, W_1, W_2$ = model parameters.

Tabla 14-2. Resumen de los modelos de circulación condicionada.

Fuente: Mehmood (2003).



Modelos de distancia de seguridad

Los modelos de distancia de seguridad están orientados a que **la distancia entre los dos vehículos se mantenga dentro del margen "deseado"** por el conductor perseguidor. Son similares a los modelos estímulo respuesta, y podrían considerarse una extensión de éstos. Dentro de este tipo están los modelos usados en los microsimuladores NETSIM, FRESIM, e INTELISIM.

Una extensión de estos modelos son los modelos de sistemas dinámicos (Mehmood, 2003). En ellos se toman en cuenta la posición y velocidad de los vehículos implicados, así como la psicología de cada uno de los conductores implicados. El hueco que hay entre un vehículo y otro es evaluado por el conductor, según sus propias características y psicología. Si dicho hueco no es adecuado, el conductor toma las medidas correspondientes, pero también en función de su propia manera de ser. Se introduce el concepto de **hueco confortable** para el usuario, en contraposición al hueco que es seguro. En realidad, se observa que los conductores aceptan huecos que se considerarían inseguros, según algunos modelos.

Este modelo tiene en cuenta las circunstancias que rodean la conducción, pues éstas definen los huecos considerados confortables. Este hueco varía en función del tipo de vehículo, del tipo de conductor, del entorno que rodea a la carretera, de si el vehículo precedente es pesado o no, de si se encienden las luces de freno, etc.

A continuación se muestra un esquema de este modelo, donde las diferentes variables se relacionan entre sí.

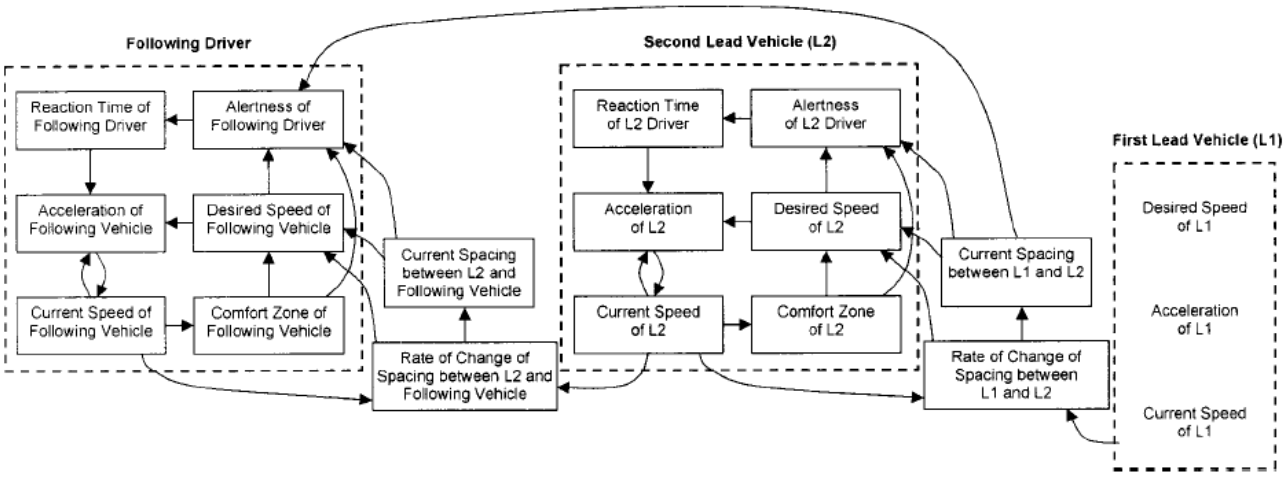


Figura 14-2. Esquema de un modelo de sistema dinámico

Modelos psico-físicos

Leutzbach (1968) propuso el primer modelo psico-físico que soluciona las dos principales limitaciones de los modelos estímulo-respuesta. En primer lugar, el perseguidor no tendrá en cuenta al vehículo que tiene delante si hay una gran distancia entre ellos. En segundo lugar, los conductores no son capaces de percibir pequeños cambios en la velocidad. Leutzbach introduce el concepto de **umbral de percepción**, como la mínima diferencia de velocidad relativa que un conductor es capaz de percibir. El conductor sólo reaccionará para estímulos mayores que el umbral. Si la distancia entre los vehículos es

muy grande, el riesgo es inferior al umbral, y el conductor no presta atención al conductor que le precede.

Estos modelos presentan problemas para calibrar ese umbral, y, por tanto, para calibrar el modelo en su conjunto. Pero, a pesar de todo, se usan en algunos microsimuladores como PARAMICS, y VISSIM.

Modelos de lógica difusa

Por último, los modelos de lógica difusa reducen el comportamiento del conductor a una serie de **comprobaciones lógicas**. Se supone que el conductor realiza comprobaciones del tipo "si ocurre…, entonces hago…". Por ejemplo, "si la distancia es menor que un umbral, entonces, freno". Estas cláusulas son fácilmente programables, pues son la base de los comandos "if… then…" que existen en todos los lenguajes de programación.

Estos modelos no son aplicables directamente, pues no tienen en cuenta la variabilidad del comportamiento humano. Los conductores no son computadoras, y las reacciones que presentan varían de unas situaciones a otras, según una cierta aleatoriedad.

14.4 Comportamiento ante una incorporación

La maniobra de incorporación siempre se realiza en una intersección entre dos carreteras. Por tanto, la primera fase de tareas que el conductor debe realizar corresponden a las correspondientes al afrontar una **intersección**.

El conductor percibe la proximidad de la misma, y reduce su velocidad si es necesario. **Al ir acercándose**, el conductor debe observar las indicaciones de dirección existentes, así como la tipología de la misma, para hacerse una idea de la trayectoria a seguir.

En este punto el conductor toma consciencia de si tiene prioridad de paso o no.

En caso de tener preferencia, el conductor puede despreocuparse por la intersección. Sólo le interesa comprobar que los vehículos sin preferencia respetan esta situación, y verificar que no hay ningún vehículo que en esos momentos esté realizando alguna maniobra que se interponga en su trayectoria. Es posible que en el momento de acercarse a la intersección, algún vehículo anterior sin preferencia esté finalizando una maniobra de incorporación o cruce, que interfiera con el vehículo con preferencia. Éste se verá obligado a reducir su velocidad para facilitar la maniobra en curso.

En caso de no tenerla, tendrá que reducir todavía más su velocidad, hasta alcanzar una velocidad que le permita ceder el paso a los conductores de la vía preferente. Si, en el curso de su trayectoria, debe realizar una parada obligatoria por la existencia de una señal de "stop", el conductor reduce su velocidad hasta pararse completamente en el punto señalado. Si la señal es de "ceda", la velocidad del conductor, en el punto de incorporación será suficientemente reducida para permitirle una evaluación segura del hueco.

El conductor llega al punto de decisión, situado a unos metros del final del carril por el que circula. Dicho carril "desemboca" en la vía con preferencia. A partir de ahí, la maniobra que debe seguir es similar a la de un cambio de carril.

Chovan y otros (1994) definen el cambio de carril (*lane change*) de una manera amplia. Para ellos es una familia de maniobras que incluyen el cambio de carril simple, la

incorporación, la salida, el adelantamiento, cambio de varios carriles a la vez. Toda esta familia tiene en común que se trata de maniobras que suponen un cambio deliberado y sustancial en la posición lateral del vehículo (respecto a la vía).

Así mismo, estos autores describen el comportamiento del conductor frente a un cambio de carril de la siguiente manera. El conductor decide realizar el cambio de carril, por su propia iniciativa (si se trata de un cambio de carril discrecional), u obligado por las circunstancias (cambio de carril impuesto). Este último caso se da cuando su carril desemboca en otro, por ejemplo.

Lo primero que hace el conductor antes de realizar el cambio de carril es comprobar que éste es legal. Para ello observará las señales de tráfico, tanto verticales como horizontales.

Si esta maniobra está permitida (en el caso de incorporaciones se trata de una maniobra casi obligada), el conductor inicia una **fase de recopilación de información**. Observará por sus retrovisores en busca de vehículos circulando por ese carril, y vehículos que le siguen que también desean realizar esta maniobra. El conductor también tratará de detectar vehículos en el ángulo muerto, si es capaz. También mirará hacia delante en busca de vehículos que circulen en dicho carril, para evitar una colisión por alcance.

En el caso de autopistas de varios carriles, también observaría los vehículos que circulen por el carril más lejano, por si alguno de éstos tiene la intención de cambiar de carril hacia el carril más cercano. En cambios de carril generales (no aplicable a incorporaciones), analizará si la vía presenta, hacia delante, restricciones al cambio de carril tales como curvas, puentes estrechos, intersecciones, etc.

Los **huecos** respecto a estos vehículos son analizados, y el conductor evalúa si son suficientes para realizar la maniobra de manera segura.

Si el hueco se evalúa **en términos de tiempo**, se define como el tiempo transcurrido entre la llegada a la intersección de dos vehículos sucesivos (Hamed y otros, 1997). Concretando más, el tiempo transcurrido desde que la parte posterior del vehículo que va delante, pasa por un punto determinado, hasta que la parte frontal del vehículo que va detrás, llega a ese punto.

Si el hueco se evalúa **en términos de espacio**, se define como la distancia entre la parte posterior del vehículo que va delante y la parte frontal del vehículo que le sigue.

Si el conductor decide que la maniobra puede ser llevada a buen término, un conductor ideal señalizaría su intención activando la luz ámbar intermitente de cambio de dirección. En incorporaciones, muchos conductores activan esta señal en el momento de llegar al carril de incorporación, antes de empezar a analizar su situación, pues, sea como fuere, dicha maniobra la van a realizar igualmente (no es una maniobra discrecional). Sin embargo, hay muchos conductores que no usan sus intermitentes, poniendo en peligro su vehículo. En un estudio experimental realizado por Lee y otros (2004), descubrieron que sólo el 48% de las maniobras de cambio de carril hacia la izquierda se señalizaban. Mientras que, para las maniobras hacia la derecha, ese porcentaje es todavía menor: 35%.

En este momento, el conductor **inicia la maniobra** propiamente dicha. Primero, el conductor aplica un cambio de dirección al volante. Aunque en incorporaciones este giro de volante puede no ser necesario.

Si es una maniobra de incorporación, también aplica presión sobre el acelerador para cambiar su velocidad. Conforme el vehículo se acerca a la posición adecuada del carril objetivo, el conductor deja de aplicar el cambio de dirección y comienza a aplicarlo en sentido contrario. Conforme el vehículo se acerca a la velocidad adecuada para la vía, el conductor deja de aplicar presión sobre el acelerador.

La maniobra finaliza cuando el vehículo está centrado en el carril objetivo, circulando a una velocidad adecuada. Una vez se ha completado, el conductor desactiva la luz intermitente (si la activó).

El diagrama siguiente muestra estas fases en la maniobra.

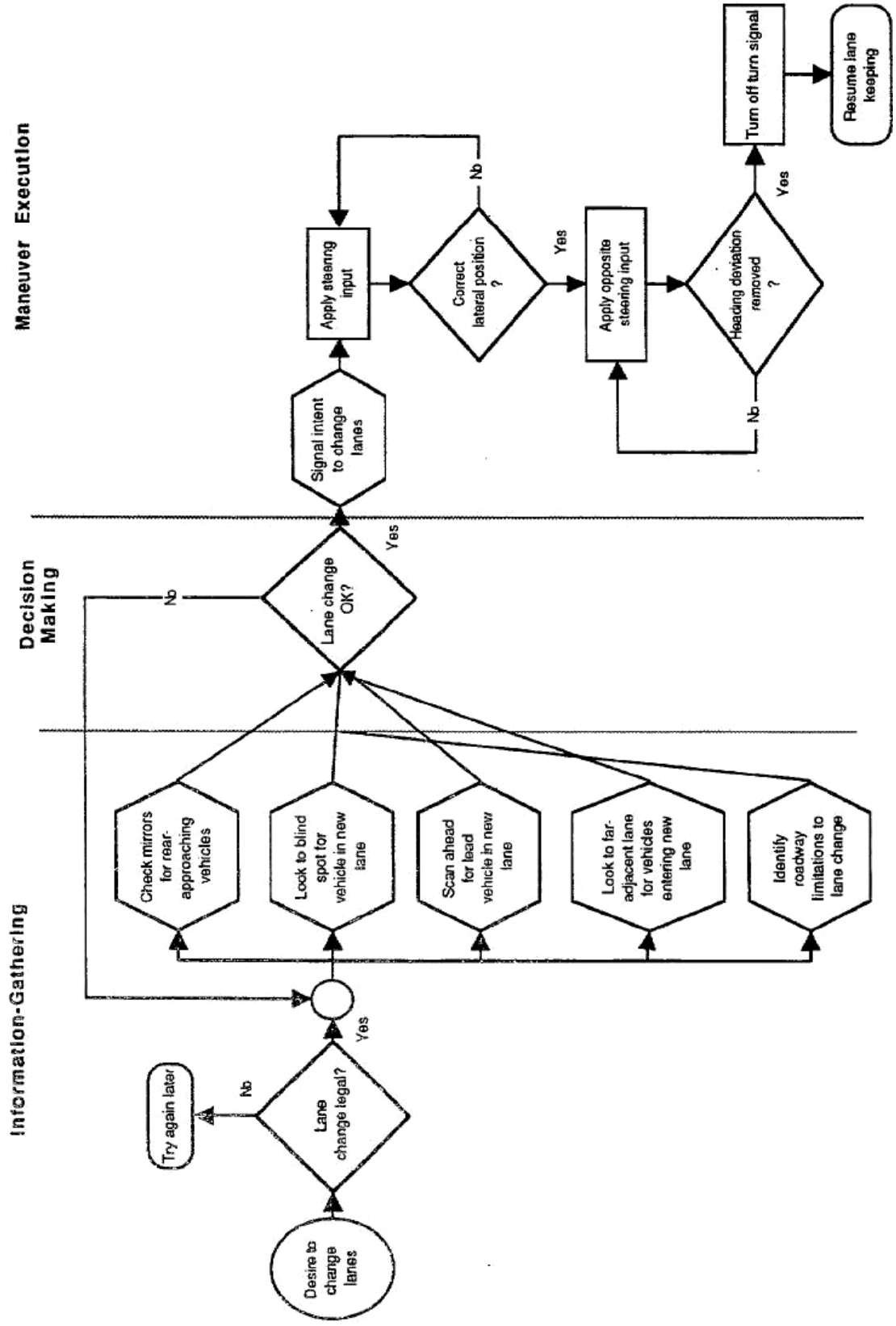


Figura 14-3. Diagrama de flujo para la realización de una maniobra de cambio de carril

La principal diferencia entre la maniobra de incorporación y el resto de maniobras de cambio de carril es la **velocidad inicial**. En una incorporación, la velocidad del vehículo que se incorpora es nula, o bien es muy pequeña, comparada con los vehículos de la vía principal. El conductor se ve obligado a realizar una aceleración, simultáneamente a la actuación sobre el volante, para conseguir la posición transversal deseada.

La otra gran diferencia es que la incorporación es una **maniobra impuesta**, al contrario de otras discrecionales. El conductor debe realizarla para poder continuar con su viaje.

Una **maniobra de cambio de carril discrecional** ocurre cuando el conductor está insatisfecho con las condiciones de circulación de su carril, y percibe que esta situación cambiaría si se cambiara de carril. El cambio de carril es voluntario, no necesario.

Ahmed y otros (1996) desarrollaron un modelo de cambio de carril que cubre tanto los discrecionales como los obligatorios. Este cambio de carril lo dividen en 4 fases:

- decisión de realizar la maniobra,
- elección del carril objetivo (hacia el que dirigirse),
- evaluación de los huecos en dicho carril, y
- realización de la maniobra.

14.5 Modelos de aceptación del hueco

14.5.1 Modelos propuestos por diversos autores

Los primeros modelos de aceptación de huecos se desarrollaron en los años 60 y 70. Asumen que cada conductor de la población tiene un **hueco crítico** característico. Cuando se presenta en una incorporación, evalúa el hueco existente. Si es mayor que el hueco crítico, la maniobra es segura y se dispone a realizarla. Si es menor que el crítico, el hueco es rechazado y el conductor espera que se presente un hueco mayor.

Es un modelo de lógica difusa que podría resumirse con el siguiente algoritmo:

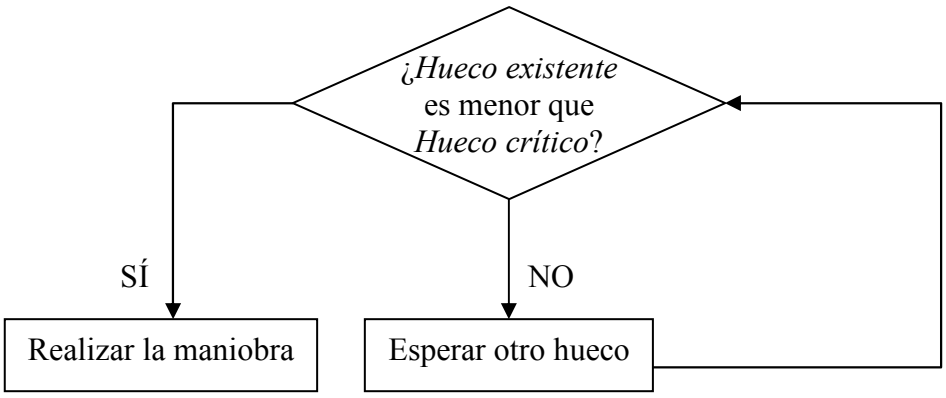


Figura 14-4. Algoritmo de aceptación del hueco

La variable "hueco crítico", toma diferentes valores entre la población de los conductores. Diferentes autores la han descrito de diversas maneras: como una variable de distribución normal, exponencial, log-normal,…

Un mismo conductor, presentará un hueco crítico diferente para cada tipo de maniobra que se le presente. En realidad, para cada intersección con la que se encuentre. "The Highway Capacity Manual" (1994) indica que el hueco depende de los siguientes **factores**:

- tipo de maniobra que debe ser ejecutada,
- tipo de regulación de tráfico (stop o ceda),
- velocidad media de la vía con preferencia,
- número de carriles de la vía con preferencia, y
- otras condiciones ambientales.

Revisiones posteriores de este modelo han introducido que el hueco **puede no ser una constante característica del conductor**. Puede que un mismo conductor acepte huecos en un determinado momento, que rechazaría en otro, incluso para las mismas condiciones ambientales.

En ese caso, hablaríamos del hueco crítico de un conductor, en un instante determinado, en una situación determinada.

$$G_n^{cr}(t) = G_n + \varepsilon(t)$$

$G_n^{cr}(t)$ es el hueco crítico del conductor n en el instante t.

G_n es el hueco crítico característico del conductor n.

$\varepsilon(t)$ es una componente residual aleatoria, que toma diferentes valores tanto para un mismo conductor, como para conductores diferentes.

Mahmassani y Sheffi (1981) indicaron que el hueco crítico podría variar, en idénticas condiciones, **en función del tiempo de espera del conductor**. Cuando un conductor permanece mucho tiempo esperando un hueco razonable para realizar la maniobra, puede llegar a impacientarse, y acabar aceptando un hueco muy pequeño, incluso conflictivo. Esta idea ha sido estudiada por diversos autores posteriormente, y corroborada (Adebisi y Sama, 1989).

El modelo podría escribirse así:

$$G_n^{cr}(t) = G_n + f(i) + \varepsilon(t)$$

f es una función decreciente al aumentar i.

i número de huecos rechazados hasta ese momento.

Estos mismos autores (Adebisi y Sama, 1989) intentaron relacionar el hueco crítico con otras variables, tales como el sexo, la edad, o los años de experiencia al volante. Ninguna de estas variables resultó ser estadísticamente significativa.

No obstante, Yan y otros (2004), con un estudio sobre el comportamiento de los conductores en un simulador, llegan a la conclusión contraria. La edad del conductor sí influye en el hueco aceptado. Conductores mayores requieren de huecos mayores para iniciar la maniobra. No encontraron diferencias con el sexo. Y apuntaron a otra variable que significativa: **la velocidad media de los vehículos de la vía con preferencia**. Si los vehículos de la vía principal circulan a gran velocidad, un conductor que trate de incorporarse a ella lo hará con mayor cautela, requiriendo huecos mayores.

Staplin (1995) analiza el comportamiento de los conductores mayores frente a maniobras de giro a izquierda (en intersecciones a nivel). Lo hace mediante simulador. El resultado es interesante pues comenta que los conductores mayores tienen problemas para evaluar la velocidad de acercamiento de los vehículos del tráfico opuesto. El hueco percibido era el mismo, tanto si el vehículo se acercaba a 48 km/h, como si lo hacía a 92 km/h. Esto se traduce en una mala evaluación del hueco para velocidades medias y grandes: el hueco es percibido como más pequeño de lo que en realidad es.

Una idea utilizada por diversos autores (Kim y otros, 2004; Kaysi y Alam, 2000) es que los conductores sean clasificados según su nivel de agresividad. El hueco crítico está íntimamente relacionado con la **psicología del conductor**. Conductores más agresivos usarán huecos menores, mientras que otros más conservadores esperarán. El siguiente gráfico muestra cómo los factores psicológicos influyen en la decisión (Figura 14-5). En primer lugar, la impaciencia del conductor, al llevar un rato esperando. También se denomina "**aprendizaje**" puesto que el conductor modifica su comportamiento en función de lo que ha visto anteriormente. En segundo lugar, la actitud del conductor, en especial, su **agresividad**.

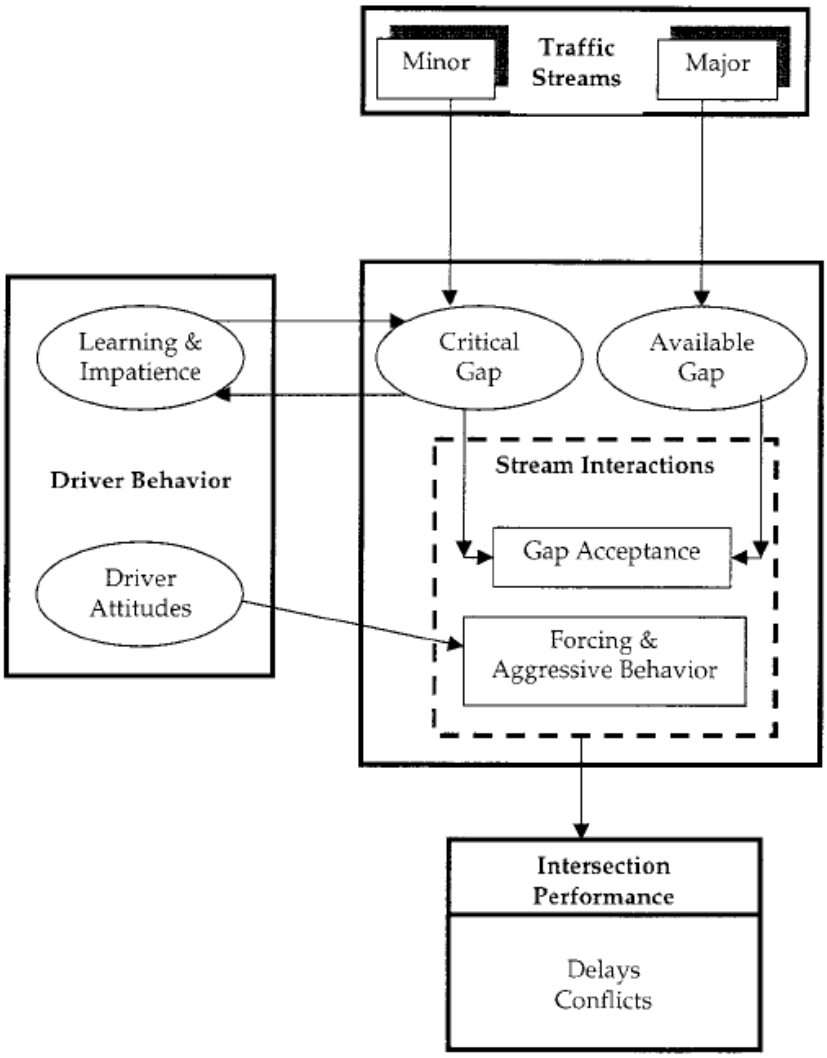


Figura 14-5. Influencia de la psicología en el proceso de aceptación de huecos

Kim y otros (2004) al estudiar las maniobras de incorporación en carriles de aceleración (y entrada) de autovías consideran otro factor más: **la distancia hasta el final del carril**. Esto aparece por primera vez en la literatura especializada en Kita (1993). Este tipo de entradas sirven para facilitar el acceso de los conductores a la vía rápida. Pero tienen una longitud limitada. A medida que el conductor se acerca al final de dicho carril se le presentan dos alternativas: o acepta el hueco y se incorpora, o bien lo rechaza definitivamente y detiene su vehículo, en espera de otro mejor, renunciando a la facilidad que le proporciona circular a cierta velocidad. Ante esta disyuntiva, la mayoría de los conductores aceptarán el hueco existente, por muy pequeño que sea.

La Tabla 14-3 muestra los valores de hueco crítico correspondientes a cada uno de las familias de conductores consideradas, en función de su agresividad. Los conductores tipo "1" son los más conservadores, mientras que los tipo "10" son los más agresivos. Y, por otro lado, muestra el hueco crítico en función de la posición en el carril. La posición "1" es la primera parte del carril, mientras que la posición "8" es el extremo final el mismo.

(unit: sec)

		Section ID							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Index of driver types	1	6.00	5.30	4.00	3.80	4.00	2.97	2.70	2.05
	2	4.80	3.67	3.20	2.85	2.90	2.25	2.06	1.61
	3	4.60	3.50	2.80	2.60	2.60	2.00	1.82	1.42
	4	4.30	3.25	2.75	2.45	2.42	1.93	1.67	1.31
	5	4.20	3.05	2.60	2.30	2.25	1.80	1.53	1.20
	6	3.85	2.90	2.50	2.10	2.04	1.68	1.38	1.10
	7	3.70	2.65	2.40	1.90	1.85	1.55	1.23	0.95
	8	3.60	2.40	2.31	1.80	1.65	1.42	1.10	0.70
	9	3.35	2.20	2.10	1.65	1.40	1.25	0.95	0.58
	10	3.00	1.90	1.80	1.30	1.10	1.08	0.68	0.42

Tabla 14-3. Hueco crítico según agresividad del conductor y posición en el carril de aceleración

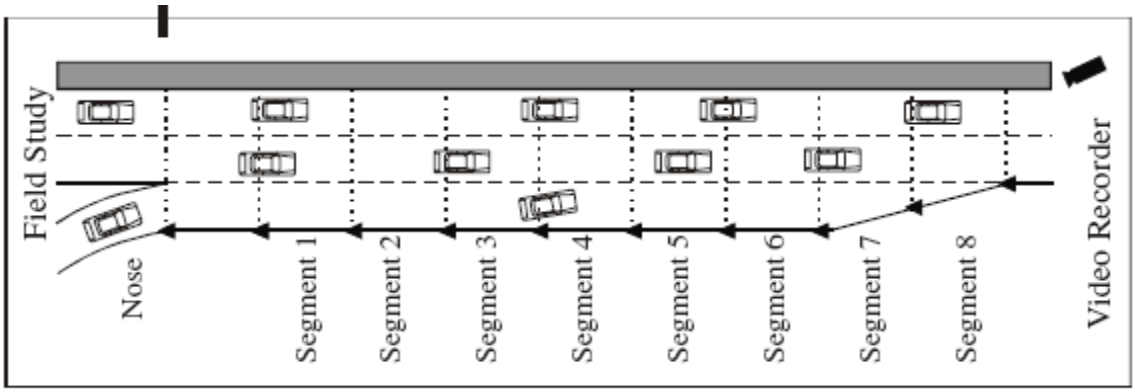


Figura 14-6. División del carril de aceleración en segmentos

Caird y Hancock (1994) comentan también que la evaluación del hueco es subjetiva, y la psicología del conductor tiene un peso específico importante. Esto explica

que cuando se aproxima un **vehículo pesado**, el conductor valore el hueco existente como menor de lo que en realidad es. Los conductores presentan una tendencia a creer que los huecos respecto a vehículos pesados son mucho menores que respecto a motocicletas (aun siendo iguales).

Hamed y otros (1997) presentan el siguiente modelo, para el estudio de los huecos aceptados en giros a izquierda (Figura 14-7). Podemos esperar una cierta analogía entre los huecos en maniobras de cruce (como la estudiada por los autores) y en maniobras de incorporación (como la estudiada en el presente texto).

En él se tienen en cuenta diversos factores. La hora del día, el volumen de tráfico, la geometría de la intersección, las circunstancias personales del conductor, el motivo del viaje, la edad del conductor y del vehículo,… son evaluadas en el "**modelo de demora esperada**". Este modelo estima el tiempo que el conductor está dispuesto a esperar en una determinada intersección. En función de la demora esperada y de los huecos reales, el "**modelo de aceptación del hueco**" indica si el conductor inicia o no la maniobra. Si esto se aplica a una intersección en concreto, con muchos conductores circulando por ella, podemos utilizar el "**modelo de hueco crítico medio**" para calcular la media de todos los huecos críticos de los distintos conductores. El resultado es un hueco crítico característico de la intersección, en función de las propiedades de la misma, y de los conductores que circularon por ella.

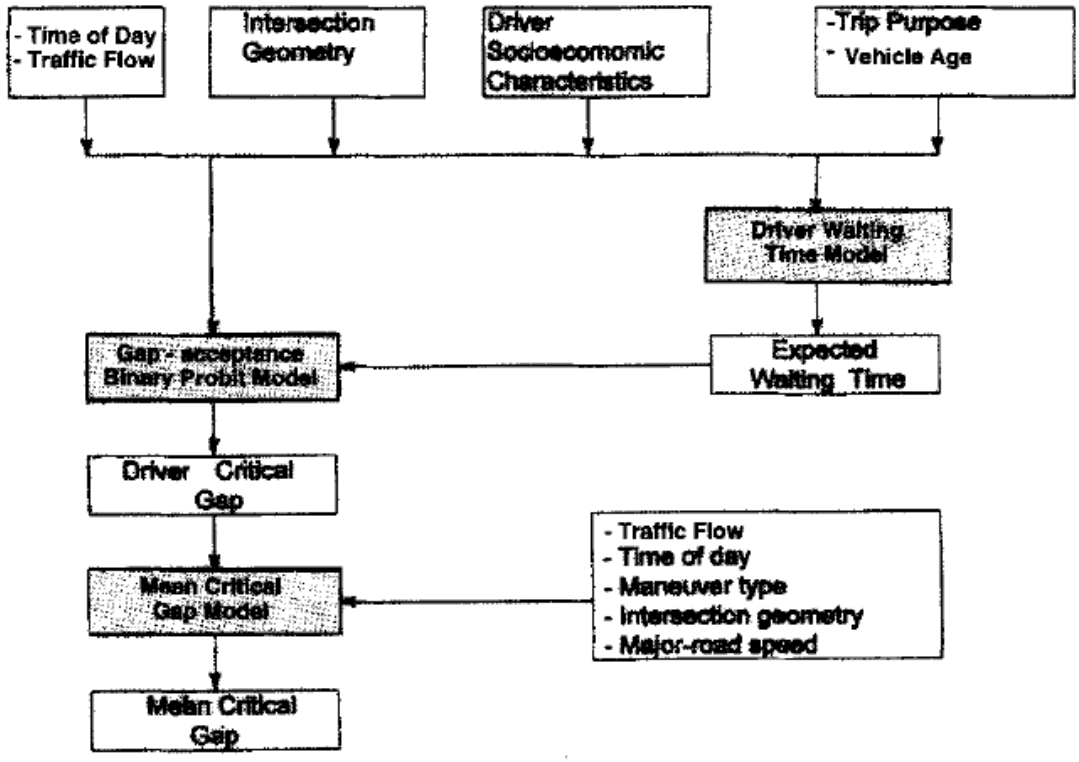


Figura 14-7. Modelo para el cálculo del hueco crítico

Los autores analizaron los diferentes **factores que influyen en el modelo**. Obtuvieron que el volumen de tráfico en la vía principal tiene un efecto muy significativo. Los conductores esperan tener que demorarse más tiempo en la intersección, si saben que la vía principal presenta mucho tráfico.

Si existe canalización para la realización de la maniobra, los conductores esperan demorarse menos, pues la maniobra está más facilitada.

Si analizamos la edad, los conductores más jóvenes esperan demorarse menos tiempo, en comparación con los mayores. En cuanto al sexo, los hombres aceptan huecos menores que las mujeres. Hay mayor proporción de conductores agresivos entre hombres jóvenes.

El motivo del viaje también presentó una influencia estadísticamente significativa. Si el motivo era el trabajo, el conductor tiende a aceptar huecos menores. La explicación reside en que los viajes por motivos de trabajo son rutinarios, se dan con frecuencia, con lo que el usuario está familiarizado con la ruta a seguir, y las intersecciones que se va a encontrar.

La hora del día también influye, pues los conductores esperan encontrarse con menores volúmenes de tráfico, si se trata de una hora distinta a la hora punta.

El tiempo de espera en la cola tiene una influencia, pues el conductor se impacienta. Los conductores aceptan huecos menores si ya han estado esperando mucho tiempo para un hueco aceptable, y éste no se ha presentado.

La edad del vehículo resultó ser significativa, también. Puede deberse a que vehículos recientes son conducidos por conductores más jóvenes, y más agresivos. Por otro lado, los vehículos más antiguos tienen menos prestaciones, y menos capacidad para acelerar y realizar la maniobra en poco tiempo.

En cuanto a las características de generales de la intersección, el tipo de maniobra es importante. Los giros a izquierda desde la vía secundaria requieren huecos mayores que los giros a izquierda desde la vía principal.

El número de carriles también influye, pues si la vía principal tiene varios, el hueco requerido para realizar la maniobra es mayor.

La canalización de las maniobras también reduce el hueco crítico, pues el conductor se siente más protegido y favorecido en la realización de la maniobra.

Ahmed (1999) indica, basándose en otros textos anteriores, que en la evaluación de los huecos, el conductor tiene en cuenta **tanto el hueco precedente como el hueco posterior**. Son consideradas las distancias con los vehículos más cercanos de la vía con preferencia, tanto hacia delante como hacia atrás. El hueco precedente se denomina *lead gap* o *trailing gap,* en inglés, y el hueco posterior, *lag gap*. La maniobra solamente es aceptable si ambos huecos lo son. Este concepto se recoge también en otros textos (por ejemplo, Kim y otros, 2004).

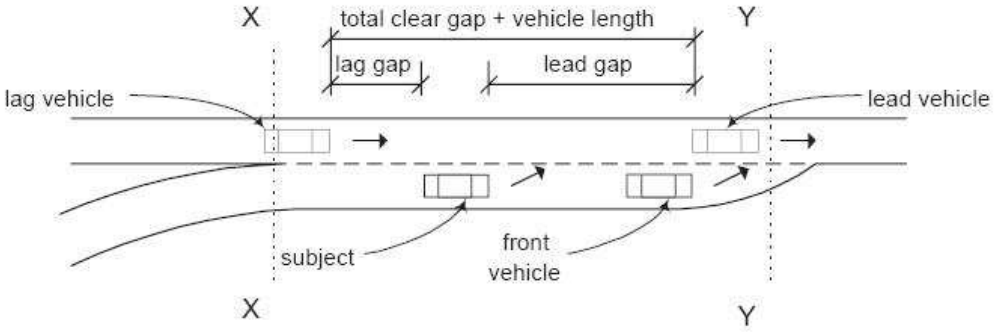


Figura 14-8. Huecos hacia delante y hacia atrás

Este autor realizó un estudio experimental en el que se filmaron cientos de maniobras de cambio de carril e incorporaciones. Esas maniobras se restituyeron de manera que se obtuvo, en cada instante, la posición y velocidad de los vehículos que aparecen en la imagen. Las técnicas utilizadas para este procedimiento se describen en otro capítulo de la investigación que nos ocupa. Tras analizar los datos, el autor presenta un modelo de regresión que se ajusta razonablemente bien a los datos. Este modelo calcula los huecos hacia delante y hacia atrás de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} G_{cr,n}^{lead,mlc}(t) &= \exp(0.384 + \epsilon_n^{lead,mlc}(t)) \\ G_{cr,n}^{lag,mlc}(t) &= \exp(0.587 + 0.0483\ \min(0, \Delta V_n^{lag}(t)) + \\ &\qquad 0.356\ \max(0, \Delta V_n^{lag}(t)) + \epsilon_n^{lag,mlc}(t)) \end{aligned}$$

$G_{cr,n}^{lead,mlc}$ es el hueco crítico respecto al vehículo precedente (*lead vehicle*), para el conductor *n*, en una situación de cambio de carril impuesto u obligado (*MLC situation = mandatory lane change*).

$G_{cr,n}^{lag,mlc}$ es el correspondiente hueco crítico respecto al vehículo de detrás.

Ambos huecos están calculados en metros.

$\varepsilon_n^{lead,mlc}$ y $\varepsilon_n^{lag,mlc}$ son variables de residuo aleatorio, que siguen una distribución estadística normal, de media cero y desviación típica 1,07.

ΔV_n^{lag} es la velocidad relativa entre el vehículo que trata de incorporarse y el vehículo de la vía con preferencia, situado hacia atrás (respecto al vehículo en incorporación).

Puede comprobarse que cuando la velocidad relativa es nula, el hueco crítico puede llegar a ser menor de 2 m. Sin embargo, cuando la velocidad relativa aumenta a 8 m/s, el hueco crítico aumenta exponencialmente hasta 32 m, o, lo que es lo mismo, un tiempo hasta la colisión de 4 s.

La **velocidad relativa** de los vehículos entre sí tiene mucha influencia en las maniobras de incorporación. Si hay un vehículo lento delante, el conductor que se incorpora tenderá a adoptar la velocidad del vehículo lento, para evitar accidentes por alcance. Si el vehículo situado hacia atrás en el carril con preferencia, circula con menor velocidad que el vehículo que trata de incorporarse, el "tiempo para la colisión" es infinito. Un vehículo más lento que el propio vehículo que se incorpora no condiciona la maniobra. El conductor que se incorpora aceptará huecos menores si consigue elevar la velocidad de su vehículo a cierto nivel.

Esto nos induce a pensar que la mejor manera de describir el hueco entre los vehículos de la vía principal no es el tiempo de paso entre ellos, ni la distancia entre ellos. Para considerar la velocidad en esa valoración, es necesario describir ese hueco en términos de "**tiempo para la colisión**" entre el vehículo que trata de incorporarse y el vehículo con preferencia. Este tiempo para la colisión es infinito si la velocidad relativa entre estos vehículos es nula.

$$TTC = \frac{X_L - X_F}{V_L - V_F}$$

TTC es el tiempo para la colisión.

$X_L - X_F$ es la distancia relativa entre los vehículos.

$V_L - V_F$ es la velocidad relativa entre los vehículos.

Lee y otros (2004), en base a un estudio de campo realizado sobre 500 maniobras de cambio de carril (no sólo incorporaciones), observaron que la mayor parte de los conductores se sienten seguros con "tiempos para la colisión" de 6,08 s segundos con los vehículos más cercanos hacia atrás. Pero también un mínimo de 40 pies (12 m). A continuación se muestra la distribución de huecos aceptados, medidos como tiempo para la colisión (Figura 14-9). Podemos observar que el 95% de los mismos es superior a 6,08 segundos. Sólo un 5% de los huecos aceptados es menor de ese valor.

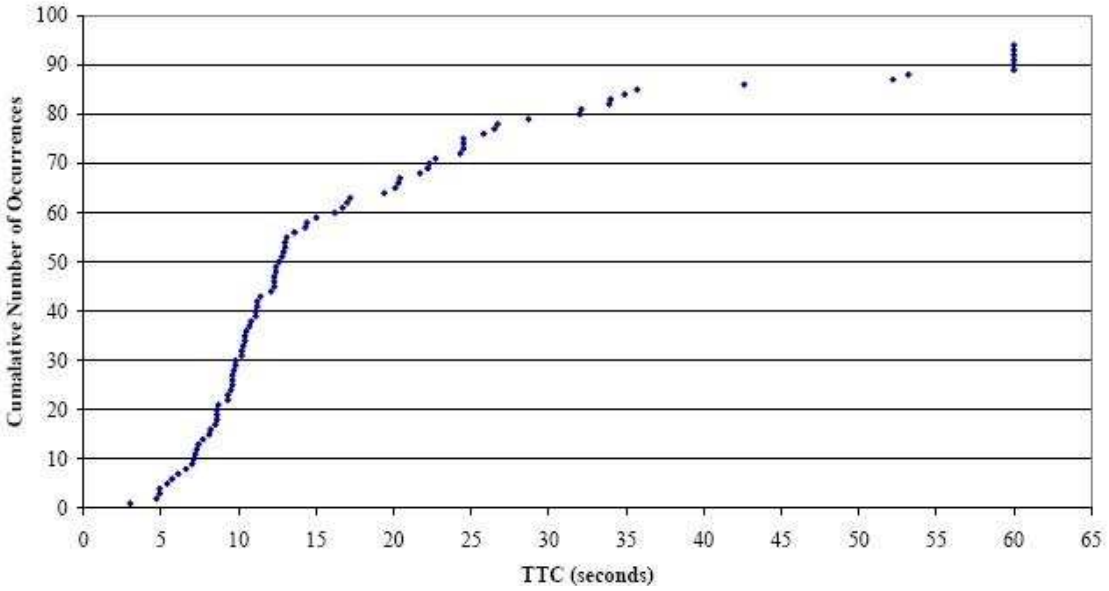


Figura 14-9. Distribución acumulada de huecos aceptados, medidos en tiempo para colisión

En cuanto al hueco hacia delante, el 95% de los mismos fue superior a 4,49 segundos.

Si combinamos los resultados del hueco hacia delante y hacia atrás, podemos obtener una "**zona de seguridad**". Si dicha zona está despejada, el conductor considera que la maniobra es segura. Como valores representativos, pueden tomarse los percentiles 95%. Pero también se muestran el cuartel 25% y los valores medios. Un gráfico similar podría construirse con los valores de los huecos aceptados, medidos en distancia.

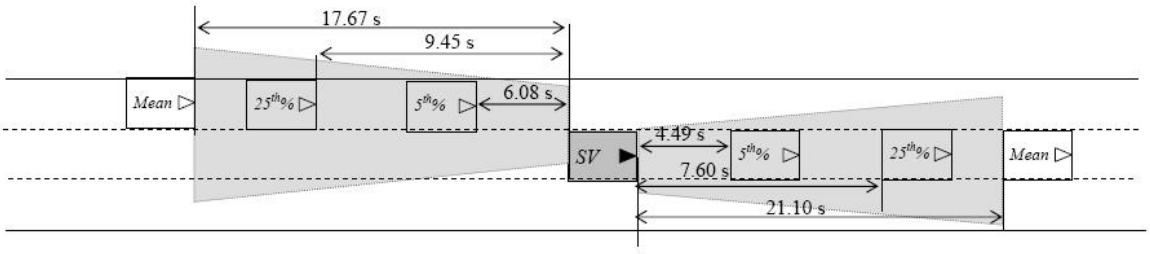


Figura 14-10. Área de seguridad, mostrando los huecos hacia delante y hacia atrás, en tiempo para colisión, para diferentes percentiles.

Davis (2004), por su parte, intenta explicar la decisión de iniciar o no la maniobra como una **variable binomial**. La formulación utilizada es la siguiente:

$$\pi_i = \frac{\exp(\beta_0 + \sum_{k=1}^{p} \beta_k \cdot (x_{i,k} - \bar{x}_k))}{1 + \exp(\beta_0 + \sum_{k=1}^{p} \beta_k \cdot (x_{i,k} - \bar{x}_k))}$$

π_i representa la probabilidad de que el hueco *i* sea aceptado, toma valores entre cero y uno.

$x_{i,k}$ es el valor que la variable explicativa *k* toma para el hueco *i*. Existen *p* variables explicativas, que influyen en la decisión.

$\bar{x}_k$ es el valor medio que la variable explicativa *k* puede tomar.

β_k son coeficientes del modelo que necesitan ser estimados.

Analizan diversos modelos, con diferentes conjuntos de variables explicativas: distancia relativa, velocidad relativa, y tiempo para la colisión. Finalmente presentan los resultados de los mejores modelos. La variable "distancia" parece ser la más importante en la decisión. Si se tiene en cuenta tanto la "distancia" como la "velocidad", la mejora del modelo no es sustancial. Tampoco se obtiene un mejor modelo si a "distancia" se añade "tiempo".

Por tanto, según este autor, la variable que mejor describe el hueco, es la distancia, no el tiempo, como tradicionalmente se utiliza.

14.5.2 Modelo propuesto en la normativa

El texto "Highway Capacity Manual" (1994) ya introduce el concepto de **hueco** en la normativa. En este texto, el hueco es considerado la clave que define si un conductor realiza o no la maniobra que se propone. Si no la realiza, esperará hasta que se dé un hueco adecuado. Esa espera es un tiempo de demora, que disminuye la calidad del servicio prestado por la infraestructura. Al demorarse él, hace que los vehículos que circulan detrás de él también se demoren, formando colas.

El estudio de estas colas es la clave para estimar adecuadamente la capacidad de una intersección. Y para distinguir en qué casos se hace necesaria la semaforización.

Por otra parte, "Intersection Sight Distance" (NCHRP Report 383, 1996) introduce el concepto de hueco en el cálculo de las visibilidades en intersecciones. Consideran que el

anterior modelo, basado en tiempos de percepción-reacción y en tiempos de frenada, no es adecuado, pues queda lejos de la realidad.

Propone un nuevo modelo que se basa en el hueco necesario por los conductores para realizar la maniobra de manera segura. El fundamento del criterio de hueco aceptado es el siguiente: conductores con visibilidad suficiente aceptan y rechazan huecos en el tráfico en función del tamaño del mismo. Los conductores que tienen perfecta visibilidad aceptan un hueco de 8 s (por ejemplo), y el funcionamiento de la intersección es correcto, sin dar lugar a conflictos. Un conductor con visibilidad limitada a 8 s, se incorporará al tráfico cuando no vea a nadie, y el funcionamiento será correcto, pues habría tomado la misma decisión, de haber tenido visibilidad suficiente.

Sin embargo, si una intersección tiene visibilidad menor, el conductor se incorporará cuando no vea a nadie, pero entonces puede que el hueco aceptado sea menor del que él mismo hubiera aceptado con la visibilidad suficiente. En ese caso, hay riesgo de colisión.

Posteriormente, "A policy on geometric design of highways and streets" (2001), conocido familiarmente como "Green Book", toma como válidas las hipótesis del "NCHRP Report 383". Los valores que indica como adecuados para el diseño de la visibilidad de las intersecciones son los siguientes (Tabla 14-4):

Giro a derechas tras un "stop"	Hueco crítico (segundos)
Turismo	6.5
Camión no articulado	8.5
Camión articulado	10.5

Giro a derechas tras un "ceda"	Hueco crítico (segundos)
Turismo	8.0
Camión no articulado	10.0
Camión articulado	12.0

Tabla 14-4. Valores propuestos para el cálculo de visibilidades en intersecciones

Hay que comentar que estos valores están aumentados considerablemente, para conseguir un margen de seguridad. Dichos valores se usan para calcular la distancia de visibilidad en intersecciones, por lo que queda del lado de la seguridad tomar un valor grande. Estos valores corresponden a huecos que la inmensa mayoría de los conductores aceptaría. En la realidad, los valores medios de huecos aceptados son inferiores.

Para calcular el hueco crítico, se muestra en "Intersection Sight Distance" (1996) un **método empírico** muy sencillo. Definen hueco crítico como aquél que tiene la misma probabilidad de ser aceptado que de ser rechazado. Por tanto, lo único que hay que hacer es clasificar los huecos por tramos, en tantas categorías como precisión queramos obtener. En cada subgrupo habrá huecos rechazados y huecos aceptados. Por ejemplo, de los huecos comprendidos entre 6,2 s y 6,3 s hay un 10% rechazados y un 90% de aceptados. Si encontramos el subgrupo con 50% de cada tipo, ése es el hueco crítico.

En la Figura 14-11 se muestra un ejemplo de este primer método. El hueco crítico es 4,8 s. En esta categoría (que comprende los huecos entre 4,6 s y 5,0 s) hay la misma cantidad de huecos rechazados que de aceptados. En teoría, uniendo los límites de las barras, se debería dibujar una curva suave, pero hay pocos datos, y no lo hacen debido a la propia variabilidad estadística de una muestra reducida.

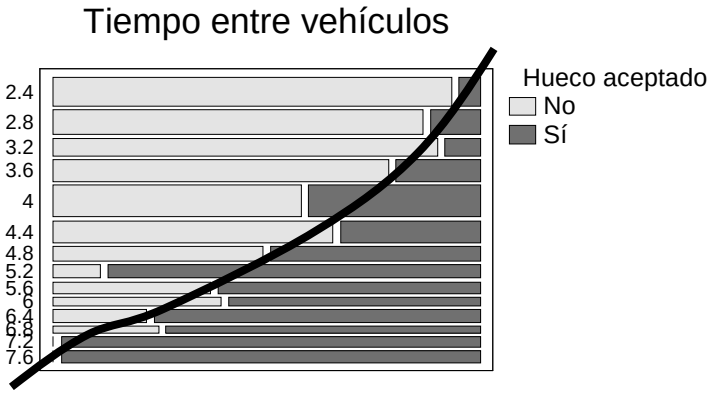


Figura 14-11. Ejemplo de cálculo del hueco crítico

Alternativamente, se cita un **método desarrollado por Raff**. Según este método, hay que representar la distribución acumulada de huecos aceptados, superpuesta con la inversa de la distribución acumulada de los rechazados. El punto en el que se intersectan ambas curvas es el hueco crítico, el hueco que presenta la misma probabilidad de ser aceptado que de ser rechazado.

En el siguiente gráfico se muestra un ejemplo de este segundo método (Figura 14-12). El hueco crítico es 4,3 s. Sólo el 10% de los huecos rechazados era mayor que ese valor, y sólo el 10% de los huecos aceptados era menor que ese valor.

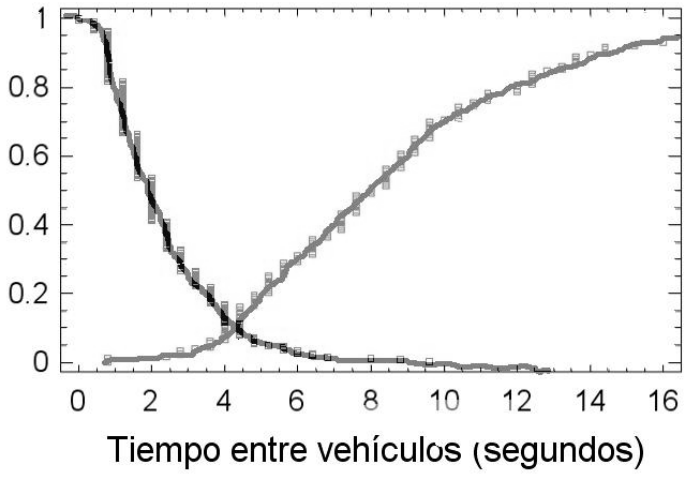


Figura 14-12. Ejemplo de gráfico para el cálculo del hueco crítico, según el método de Raff

14.6 Trayectoria seguida en un cambio de carril

14.6.1 Funciones senoidales

Chovan y otros (1994) describen la trayectoria seguida por el conductor durante el cambio de carril como funciones senoidales respecto del tiempo. Se trata de una formulación sencilla, que usa funciones continuas, fácilmente derivables e integrables. La hipótesis de partida es que la **aceleración transversal es una función senoidal en el tiempo**, ocupando la maniobra una fase completa.

$$a_y = A_y \cdot \sin(\omega \cdot t) = \frac{2 \cdot \pi \cdot Y}{t_{TOT}^2} \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{t_{TOT}}\right)$$

Donde:

a_y es la aceleración transversal,

A_y es la amplitud de la onda, es decir, la máxima aceleración transversal,

ω es la velocidad angular,

Y es la distancia transversal a recorrer en la maniobra,

t_{TOT} es el tiempo necesario para realizar la maniobra, y

t es el tiempo desde el inicio de la maniobra.

Operando, obtendremos que la velocidad y la posición transversales son:

$$v_y = \int_0^t a_y(t)\ dt = \frac{Y}{t_{TOT}}\left[1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{t_{TOT}}\right)\right] + v_{y0}$$

$$y = \int_0^t v_y(t)\ dt = \frac{Y \cdot t}{t_{TOT}} - \frac{Y}{2 \cdot \pi} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{t_{TOT}}\right) + v_{y0} \cdot t + y_0$$

v_{y0} es velocidad transversal al inicio de la maniobra. Puede considerarse nula.

y_0 es la posición transversal. Depende de lo centrado que circule el vehículo dentro de su carril.

Este movimiento transversal debe sumarse a la **componente longitudinal**. En general, puede asumirse que la velocidad es constante durante un cambio de carril normal. Pero, en incorporaciones, esta hipótesis no es válida. El vehículo inicia la maniobra con una velocidad reducida y la termina con una velocidad similar a la del resto de vehículos de la vía principal.

Jula y otros (1999) estudian las maniobras de cambio de carril e incorporaciones con este mismo modelo (propuesto por Chovan y otros, 1994). Para las incorporaciones, asumen la hipótesis más sencilla: **aceleración longitudinal constante**.

$$a_x = A_x$$

$$v_x = A_x \cdot t + v_{x0}$$

$$x = A_x \cdot t^2 + v_{x0} \cdot t + x_0$$

Los únicos parámetros de esta formulación son: la distancia *Y*, que puede estimarse fácilmente en función del ancho del carril; la aceleración longitudinal A_x; y el tiempo requerido para la maniobra t_{TOT} (o, alternativamente, la aceleración transversal A_y).

Este último parámetro es mucho más difícil de estimar, puesto que, como vemos en el modelo senoidal, tanto la velocidad transversal inicial como la final son muy próximas a cero. Durante cualquier recogida de datos experimental, encontraremos dificultades para discernir el tiempo exacto inicial y final de la maniobra. Estos autores aceptan que el **tiempo de maniobra** puede variar desde 2 s hasta 16 s, sin entrar en más detalle.

Por su parte, Finnegan y Green (1990) establecen entre 4,9 y 7,6 segundos como tiempo necesario para la maniobra, incluyendo el tiempo de búsqueda visual. Hetrick (1997), después de analizar 282 maniobras indica que el tiempo varía entre 3,4 y 13,6 s, con una moda de 6,0 s. Pero considera cambios de carril en vías de 2 carriles, no incorporaciones.

La trayectoria, para un cambio de carril, queda reflejada en la Figura 14-13. Esto es completamente aplicable a incorporaciones paralelas, por ejemplo, con carril de aceleración. En **incorporaciones oblicuas** habría que modificar algunos parámetros.

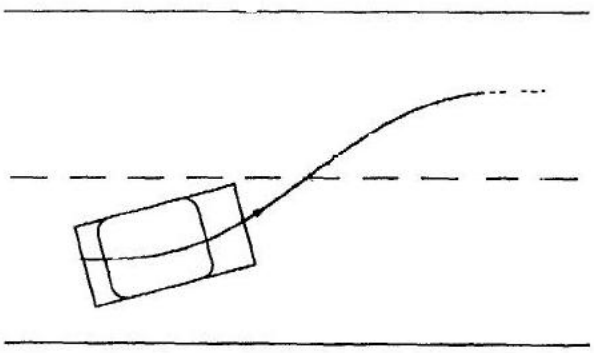


Figura 14-13. Trayectoria ideal durante la maniobra de cambio de carril

Hemos de anotar llegado este punto que ninguno de estos textos basa sus hipótesis en observaciones de las maniobras de cambio de carril reales. Solamente son hipótesis razonables, pero no contrastadas.

14.6.2 Funciones polinómicas

Otra alternativa, usada por Wang y Cartmell (1998) es usar **curvas polinómicas**. La trayectoria en "S" seguida puede representarse como una función en el plano OXY (Figura 14-14). Con esta estrategia, la trayectoria es descrita por una única expresión. En la anterior, se necesitaban dos expresiones, una para cada componente cartesiana.

$$y = Y \cdot \left(10 \cdot (x/X)^3 - 15 \cdot (x/X)^4 + 6 \cdot (x/X)^5\right)$$

X es la distancia longitudinal (eje x) recorrida durante la maniobra.

Y es la distancia transversal (eje y) recorrida, aproximadamente igual al ancho de un carril.

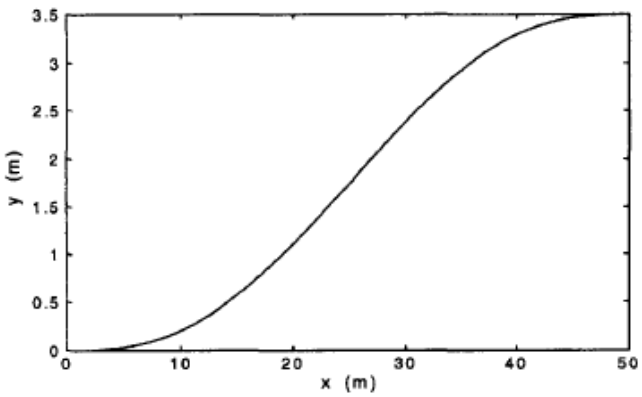


Figura 14-14. Trayectoria en "S" formada por una función polinómica de 5º orden

En la siguiente figura se muestra el cambio de dirección (giro de volante) necesario para seguir esa curva, así como la variación del ángulo del vehículo durante la misma. Puede verse que es una variación suave (Figura 14-15).

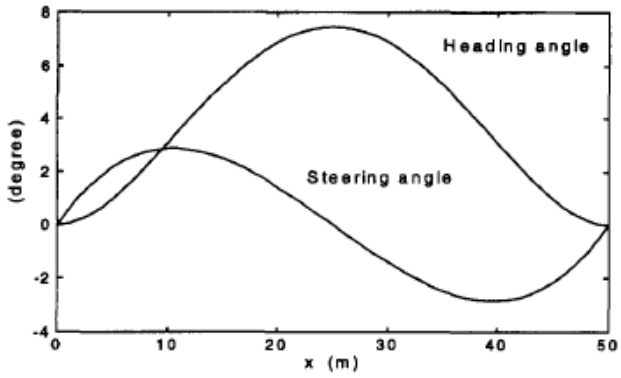


Figura 14-15. Variación de la orientación del vehículo, y actuación necesaria sobre el volante, para seguir la curva polinómica de 5º orden.

14.6.3 Funciones exponenciales

Por último, otra gran opción, es utilizar **funciones exponenciales**. A la siguiente expresión se le denomina **curva sigmoide o logística**. Se utiliza en diferentes ramas de la ciencia, tales como medicina, biología, termodinámica, cinemática, etc. Esto es así puesto que es la respuesta al problema general de "cambio de estado". Bertalanffy (1968) comenta que éste es un claro ejemplo de isomorfismos entre ciencias. Todas las ramas de la ciencia moderna tienen métodos comunes, especialmente en cuanto a herramientas matemáticas.

La ecuación de la que hablamos tiene la siguiente expresión:

$$y = y_0 + \frac{Y}{1 + \exp(C \cdot (x - x_{1/2}))}$$

C es una constante relacionada con la pendiente y' en el punto $x_{½}$.

$x_{1/2}$ es la coordenada x relativa al punto medio de la maniobra.

El resto de variables tiene el mismo significado que en las anteriores expresiones.

El siguiente gráfico (Figura 14-16) muestra un ejemplo de este tipo de funciones, con los siguientes valores de los parámetros:

$$y = \frac{3.5}{1 + \exp(-0'3 \cdot (x - 20))}$$

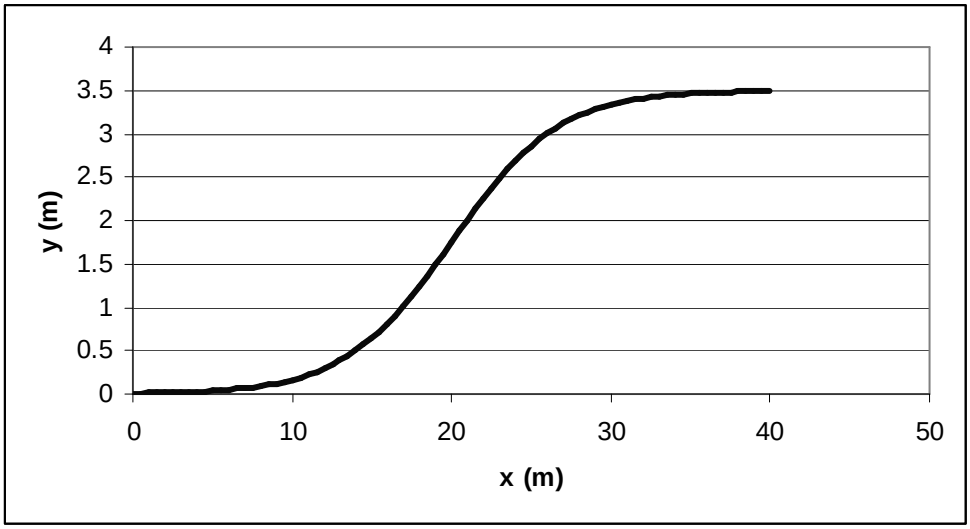


Figura 14-16. Ejemplo de una curva logística

En este caso, la derivada de la función, que correspondería al ángulo del vehículo, es una función acampanada.

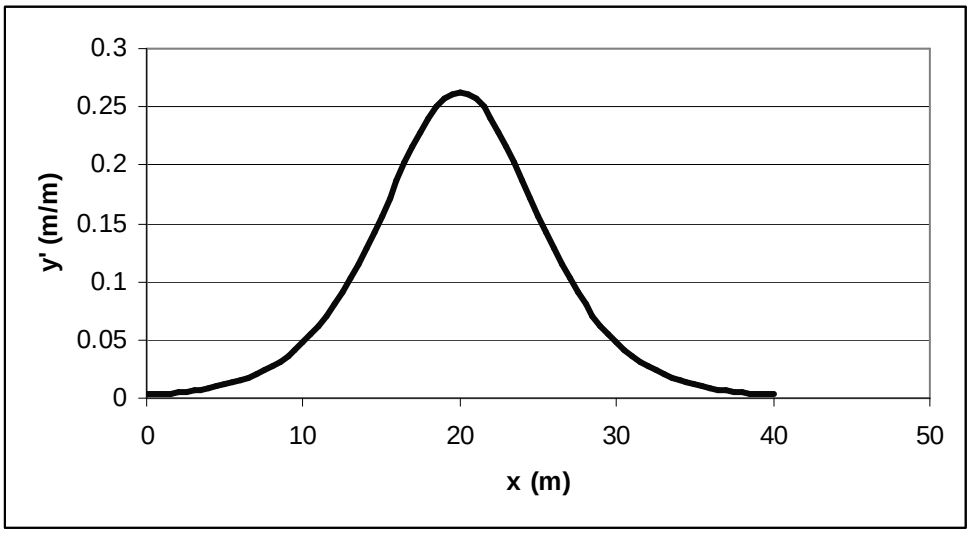


Figura 14-17. Derivada de la función logística

14.7 Conclusión

El proceso de conducción es una rutina sencilla. En realidad, según se mostró en el capítulo de dispositivos electrónicos de ayuda a la conducción, en el futuro seremos capaces de programar robots que conduzcan por nosotros.

Este capítulo ha tenido por objeto recopilar los diferentes modelos que tratan de explicar el comportamiento del conductor. En su mayor parte se trata de modelos mecanicistas, que asumen que el comportamiento se rige por unas reglas preestablecidas. Muchos incorporan la aleatoriedad y arbitrariedad del género humano como una dispersión aleatoria en las variables y coeficientes de calibración del modelo. De esta manera se asume que los conductores se rigen por las reglas del sentido común, pero que su individualidad aparece en forma de pequeñas modificaciones a esas reglas, o de variaciones en los parámetros de calibración.

Estos modelos nos permiten entender mejor cuáles son las decisiones que toma el conductor al circular por una incorporación, en general, y, en concreto, de tipo oblicuo.

Posteriormente, estos modelos se podrán implementar en un programa informático de microsimulación de tráfico, que simule la explotación real de una intersección o enlace de cualquier tipo, el funcionamiento esperable de la intersección cuando circulen por ella vehículos y conductores reales.

15 Restitución de perspectivas

15.1 Introducción

En el transcurso de la presente investigación se ha comentado varias veces la necesidad de obtener, a partir de grabaciones de video del tráfico, datos como la trayectoria, la velocidad o la aceleración.

Este proceso es la clave del éxito de este estudio, puesto que los datos que se conseguirán son necesarios para el análisis, y el empleo de videocámaras es la única tecnología a nuestro alcance. Podrían utilizarse radares u otras tecnologías para obtener la posición y velocidad de los vehículos, pero necesitaríamos otro tipo de equipos, mucho más caros.

Esta técnica, conocida como **restitución de trayectorias o restitución de perspectivas**, ya se ha utilizado en otras ocasiones, por otros investigadores, con buenos resultados. Por ejemplo, citaremos a Ahmed (1999), Davis (2004), Romero y García (2005), Wei y otros (2005).

Las grabaciones de video, al igual que las fotografías, son representaciones gráficas de la realidad. La realidad es espacial o tridimensional, pero la representación gráfica es plana o bidimensional. El paso de una a otra se realiza mediante una transformación geométrica conocida como **perspectiva cónica**. A cada punto del espacio se le hace corresponder un punto en la imagen.

La restitución de perspectivas consiste en realizar el **proceso inverso a esa transformación geométrica**. Para cada punto de la imagen, se calcula el punto del espacio que le corresponde. A partir de las coordenadas de imagen, obtenemos las coordenadas en la realidad.

Con este proceso podemos conocer la posición real de los vehículos que aparecen en la imagen, para cada instante considerado. Si lo realizamos para diferentes instantes temporales, conseguimos la **trayectoria completa**.

La velocidad o la aceleración se obtienen posteriormente, a partir de la variación temporal en la posición. Para su cálculo se parte de que la velocidad es la derivada de la posición respecto del tiempo, y la aceleración, la derivada de la velocidad.

15.2 La perspectiva cónica

15.2.1 Definición geométrica

La perspectiva cónica es un **tipo de sistema de representación**. Los sistemas de representación se definen como procesos geométricos reversibles entre el plano y el espacio (Gil Saurí, 1997). Su función es doble. Por un lado, dibujar sobre un plano las formas del espacio. Por el otro, reconstruir la forma espacial a partir del dibujo plano. Esta segunda función es la que nos interesa. Pero para entender el proceso inverso, es necesario estudiar también el directo.

El sistema cónico tiene como **elementos fundamentales** el vértice, punto de vista o centro de proyección (*V*), y el plano del dibujo o plano de cuadro (*PC*). Para obtener la representación cónica de un punto (*A*) en el espacio, se traza una recta (*r*) desde el vértice hasta el punto. La intersección de dicha recta con el plano de cuadro es la imagen del punto (*A'*). En el siguiente dibujo, para una mayor claridad, se muestra el plano horizontal o geometral (*PH*).

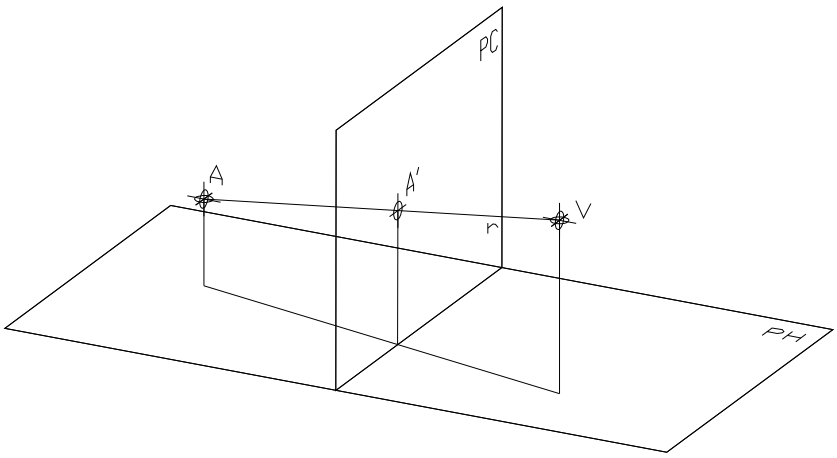


Figura 15-1. Perspectiva cónica

Entonces, para obtener la perspectiva de cualquier figura, sólo tenemos que crear un haz de rectas que salga de *V* y pase por los puntos deseados. La intersección de ese haz con el plano del dibujo nos proporciona la imagen deseada.

La intersección del plano horizontal *PH* y el plano de cuadro *PC* es la línea de tierra *LT*. El plano perpendicular al del cuadro, paralelo al plano horizontal, y pasando por el vértice, se denomina plano del horizonte. La intersección entre el plano del horizonte y el plano del cuadro es la línea de horizonte *LH*. En efecto, ningún punto perteneciente al plano horizontal tendrá su imagen más arriba que la línea de horizonte. Es una línea límite.

La proyección ortogonal del vértice *V* sobre el plano del cuadro es el punto principal *P*. Está sobre la línea de horizonte. La recta que sale de *V* y pasa por *P* es la dirección de cámara o motivo.

El plano paralelo al del cuadro, pasando por el vértice es el plano de desvanecimiento *PD*. Los puntos pertenecientes a este plano no tienen imagen en el plano del cuadro. Los puntos en el semiespacio posterior al plano de desvanecimiento tienen una imagen virtual. Corresponden a puntos a las espaldas del observador.

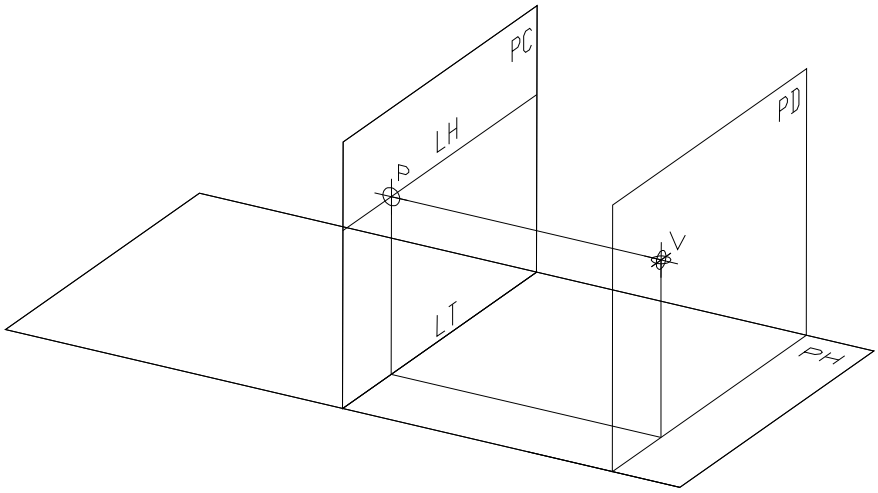


Figura 15-2. Otros elementos de la perspectiva cónica

15.2.2 La vista humana y los aparatos de fotografía

Las imágenes obtenidas mediante perspectiva cónica se parecen mucho a la percepción que tenemos de ellas mediante nuestros ojos. La razón de ello es que **el ojo tiene un funcionamiento similar**. Los haces luminosos que llegan a nuestra pupila son desviados por el cristalino hacia un punto, que es el equivalente al vértice o centro de proyección. Luego impactan sobre una superficie sensible, que es la equivalente al plano del cuadro, en la cual existen terminaciones nerviosas que recogen la información, llevándola al cerebro.

Las fotografías y videos también son perspectivas cónicas. Los haces luminosos que llegan al objetivo son desviados por las lentes hacia un punto denominado foco. Posteriormente, impactan sobre una superficie plana sensible a la luz, que es el negativo de la película fotográfica, en una cámara analógica, o los sensores fotoeléctricos de una cámara digital.

Un video es una sucesión de fotografías, por lo que cada fotograma del video puede considerarse como una perspectiva cónica de la realidad.

15.2.3 Expresiones algebraicas

Es conveniente utilizar en todo este desarrollo **coordenadas homogéneas**, tal y como recomiendan Gil Saurí (1997) y Auñón (2000).

Tomemos un punto *P* de coordenadas absolutas *(a,b,c)* con *a*, *b*, *c* números reales cualesquiera. Cualquier grupo de 4 números reales *(x,y,z,λ)* son coordenadas homogéneas de ese punto *P* si cumplen:

$$a = \frac{x}{\lambda}; \quad b = \frac{y}{\lambda}; \quad c = \frac{z}{\lambda};$$

Si $\lambda = 1$, se denominan coordenadas homogéneas normalizadas. Cualquier valor real de λ es permisible, salvo el cero. Como vemos, a cada punto le corresponden infinitas coordenadas homogéneas posibles. Es un espacio vectorial de dimensión 1.

Este artificio matemático permitirá simplificar mucho las expresiones matemáticas de estas transformaciones geométricas.

Supongamos que el vértice de la perspectiva se encuentra en el origen de coordenadas, la dirección de cámara o motivo es el eje *OZ*, y el plano de cuadro está a una distancia *d* de la cámara. Esta perspectiva se denomina **perspectiva cónica canónica** (Auñón, 2000).

En ese caso, podemos calcular la perspectiva de un punto mediante las siguientes expresiones, que se obtienen simplemente por semejanza de triángulos.

$$x_{proyección} = x_{real} \cdot \frac{d}{z_{real}}$$

$$y_{proyección} = y_{real} \cdot \frac{d}{z_{real}}$$

$$z_{proyección} = d$$

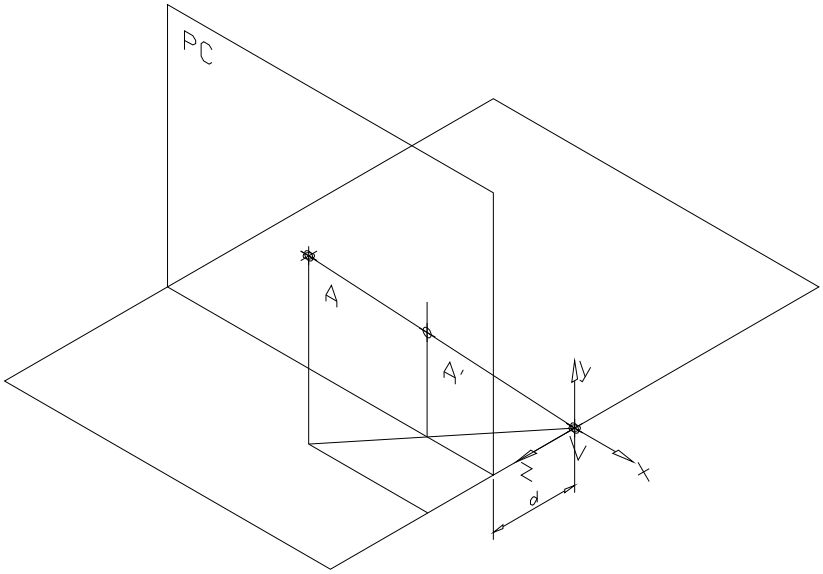


Figura 15-3. Perspectiva cónica canónica

Si reordenamos las anteriores expresiones, **de forma matricial**, en coordenadas homogéneas, obtenemos lo siguiente:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{proyección} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/d & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{real}$$

Esta forma matricial es común a todas las transformaciones geométricas de tipo lineal. Una perspectiva es una **transformación lineal** puesto que las formas proyectadas mantienen el orden correspondiente a sus originales: un punto se transforma en un punto, una recta en una recta, una curva en una curva, etc. La forma genérica de las transformaciones lineales puede expresarse así:

$$\rho \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{transformado} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{original}$$

En el caso de no tratarse de la perspectiva canónica, es necesario realizar algunos cambios.

Si el vértice no se encuentra en el origen, podemos realizar una **traslación de coordenadas**, de manera que sí lo esté. Y luego deshacer la traslación, para obtener las coordenadas originales.

Una traslación de coordenadas, usando coordenadas homogéneas, se expresa matricialmente de la siguiente manera. Los valores V_x, V_y, V_z, son las coordenadas del vértice de proyección.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{trasladado} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -V_x \\ 0 & 1 & 0 & -V_y \\ 0 & 0 & 1 & -V_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{original}$$

La perspectiva cónica de vértice (V_x, V_y, V_z), y plano de cuadro $z = d$, se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{proyección} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & V_x \\ 0 & 1 & 0 & V_y \\ 0 & 0 & 1 & V_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/d & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -V_x \\ 0 & 1 & 0 & -V_y \\ 0 & 0 & 1 & -V_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{real}$$

Si el motivo no es paralelo a la dirección *OZ* (el plano de cuadro no es paralelo al *OXY*), entonces habrá que realizar **uno o varios giros de ejes coordenados**. La expresión para un giro alrededor el eje *OX*, con un ángulo α, es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{girado} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Cos(\alpha) & -Seno(\alpha) & 0 \\ 0 & Seno(\alpha) & Cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{original}$$

Análogas expresiones pueden obtenerse para giros alrededor del eje *OY*.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{girado} = \begin{pmatrix} Cos(\beta) & 0 & Seno(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -Seno(\beta) & 0 & Cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{original}$$

Y el eje *OZ*.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{girado} = \begin{pmatrix} Cos(\gamma) & Seno(\gamma) & 0 & 0 \\ -Seno(\gamma) & Cos(\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{original}$$

Esto sumado a la traslación, en caso de que el vértice no esté en el origen, da la siguiente expresión, algo farragosa, que proporciona el valor de una **perspectiva cónica genérica**.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{proyección} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & V_x \\ 0 & 1 & 0 & V_y \\ 0 & 0 & 1 & V_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Cos(\alpha) & -Seno(\alpha) & 0 \\ 0 & Seno(\alpha) & Cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot$$
$$\begin{pmatrix} Cos(\beta) & 0 & Seno(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -Seno(\beta) & 0 & Cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Cos(\gamma) & Seno(\gamma) & 0 & 0 \\ -Seno(\gamma) & Cos(\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot$$
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/d & 0 \end{pmatrix} \cdot$$
$$\begin{pmatrix} Cos(\gamma) & -Seno(\gamma) & 0 & 0 \\ Seno(\gamma) & Cos(\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Cos(\beta) & 0 & -Seno(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ Seno(\beta) & 0 & Cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot$$
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Cos(\alpha) & Seno(\alpha) & 0 \\ 0 & -Seno(\alpha) & Cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -V_x \\ 0 & 1 & 0 & -V_y \\ 0 & 0 & 1 & -V_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{real}$$

Si T es la matriz de traslación, y G la matriz de giros, podemos simplificar la expresión:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{proyección} = T[Vx,Vy,Vz]\cdot G_x[\alpha]\cdot G_y[\beta]\cdot G_z[\gamma]\cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/d & 0 \end{pmatrix}\cdot$$

$$\cdot G_z[-\gamma]\cdot G_y[-\beta]\cdot G_x[-\alpha]\cdot T[-Vx,-Vy,-Vz]\cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{real}$$

Por otro lado, no deseamos conocer las coordenadas *(x,y,z)* del punto de proyección, pues son puntos sobre un plano inclinado cualquiera. Nos interesa quedarnos con las **coordenadas (x,y) locales en el plano**.

Para ello, no desharemos la traslación y los giros. El resultado es que la tercera ecuación resulta $z_{proyección} = d$, para todo $(x,y,z)_{real}$. La expresión para el cálculo de la perspectiva cónica se simplifica un poco:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \lambda \end{pmatrix}_{proyección} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/d & 0 \end{pmatrix}\cdot G_z[-\gamma]\cdot G_y[-\beta]\cdot G_x[-\alpha]\cdot T[-Vx,-Vy,-Vz]\cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{real}$$

Desarrollando y simplificando esta expresión, se obtiene lo siguiente:

$$x_{proy} = d\,\frac{(Vx - x)\,Cos[\beta]\,Cos[\gamma] + (Vy - y)\,(Sin[\alpha]\,Sin[\beta]Cos[\gamma] - Cos[\alpha]\,Sin[\gamma]) + (Vz - z)\,(-Sin[\alpha]\,Sin[\gamma] - Cos[\alpha]\,Sin[\beta]Cos[\gamma])}{(Vx - x)\,Sin[\beta] - (Vy - y)\,Sin[\alpha]\,Cos[\beta] + (Vz - z)\,Cos[\alpha]\,Cos[\beta]}$$

$$y_{proy} = d\,\frac{(Vx - x)\,Cos[\beta]\,Sin[\gamma] + (Vy - y)\,(Sin[\alpha]\,Sin[\beta]Sin[\gamma] + Cos[\alpha]\,Cos[\gamma]) + (Vz - z)\,(Sin[\alpha]\,Cos[\gamma] - Cos[\alpha]\,Sin[\beta]Sin[\gamma])}{(Vx - x)\,Sin[\beta] - (Vy - y)\,Sin[\alpha]\,Cos[\beta] + (Vz - z)\,Cos[\alpha]\,Cos[\beta]}$$

Señalaremos aquí que la **distancia focal *d*** ha resultado funcionar como un factor de escala. Cuando el plano de cuadro se aleja del vértice, la imagen se agranda. Esto es precisamente lo que hacen algunos equipos fotográficos al realizar zoom óptico: aumentar la distancia entre la lente y el equipo sensible.

El **denominador** de ambas fracciones es idéntico y corresponde a la coordenada z_{real} en los ejes girados y trasladados. El numerador de la primera expresión es x_{real} y el de la segunda, y_{real}, ambos también en ejes girados y trasladados.

Los **factores *Vx, Vy, Vz*** aparecen modificando las coordenadas reales x, y, z, pues son las distancias de traslación.

En cuanto a los términos en *α, β, γ,* corresponden a la **matriz de giro**. Si la matriz de giro es *G*, podríamos simplificar la expresión escribiéndola así:

$$x_{proy} = d\,\frac{(\mathrm{Vx}-\mathrm{x})\,G_{11} + (\mathrm{Vy}-\mathrm{y})\,G_{12} + (\mathrm{Vz}-\mathrm{z})\,G_{13}}{(\mathrm{Vx}-\mathrm{x})\,G_{31} - (\mathrm{Vy}-\mathrm{y})\,G_{32} + (\mathrm{Vz}-\mathrm{z})\,G_{33}}$$

$$y_{proy} = d\,\frac{(\mathrm{Vx}-\mathrm{x})\,G_{21} + (\mathrm{Vy}-\mathrm{y})\,G_{22} + (\mathrm{Vz}-\mathrm{z})\,G_{23}}{(\mathrm{Vx}-\mathrm{x})\,G_{31} - (\mathrm{Vy}-\mathrm{y})\,G_{32} + (\mathrm{Vz}-\mathrm{z})\,G_{33}}$$

Los elementos G_{ij} son los elementos de la matriz de giro, que debe cumplir, para ser una matriz de ese tipo:

$\mathrm{Det}[G] = 1$

$G^{-1} = G^{\mathrm{T}}$

Podríamos simplificar aún más las expresiones, si las expresamos matricialmente, en coordenadas homogéneas.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ \lambda \end{pmatrix}_{\text{proy homogéneas}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/d \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{pmatrix} \cdot \left[\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{real} \right]$$

$$x_{\text{proy}} = \frac{x_{\text{proy homogénea}}}{\lambda_{\text{proy homogénea}}}; \quad y_{\text{proy}} = \frac{y_{\text{proy homogénea}}}{\lambda_{\text{proy homogénea}}}$$

Por último, el origen de coordenadas definido en el espacio real, puede no tener nada que ver con el definido en el plano de imagen. En ese caso, podríamos considerar que las coordenadas $(x,y)_{proy}$ han sufrido una **traslación**.

$$x_{proy} = d\,\frac{(\mathrm{Vx}-\mathrm{x})\,G_{11} + (\mathrm{Vy}-\mathrm{y})\,G_{12} + (\mathrm{Vz}-\mathrm{z})\,G_{13}}{(\mathrm{Vx}-\mathrm{x})\,G_{31} - (\mathrm{Vy}-\mathrm{y})\,G_{32} + (\mathrm{Vz}-\mathrm{z})\,G_{33}} + S_x$$

$$y_{proy} = d\,\frac{(\mathrm{Vx}-\mathrm{x})\,G_{21} + (\mathrm{Vy}-\mathrm{y})\,G_{22} + (\mathrm{Vz}-\mathrm{z})\,G_{23}}{(\mathrm{Vx}-\mathrm{x})\,G_{31} - (\mathrm{Vy}-\mathrm{y})\,G_{32} + (\mathrm{Vz}-\mathrm{z})\,G_{33}} + S_y$$

Si, además de sufrir una traslación, hubieran sufrido un escalado, el factor de escala quedaría enmascarado con la distancia focal *d*, que es un **amplificador**.

Si además de traslación y escalado hubieran sufrido un giro, quedaría enmascarado con el giro γ, de eje *OZ*.

De manera genérica, las expresiones anteriores son de la forma:

$$x_{proy} = \frac{f_1 x + f_2 y + f_3 z + f_4}{h_1 x + h_2 y + h_3 z + h_4} + S_x = \frac{f(x,y,z)}{h(x,y,z)} + S_x$$

$$y_{proy} = \frac{g_1 x + g_2 y + g_3 z + g_4}{h_1 x + h_2 y + h_3 z + h_4} + S_y = \frac{g(x,y,z)}{h(x,y,z)} + S_y$$

Donde las funciones *f, g, h* son lineales.

Tenemos 9 parámetros que caracterizan la perspectiva:

- 3 por las coordenadas del vértice: V_x, V_y, V_z.
- 3 por la dirección o motivo: α, β, γ.
- 1 por la distancia focal: d.
- 2 por la traslación en el plano imagen: S_x, S_y.

Las 3 de dirección y la distancia focal podrían sustituirse por 3 de la coordenada del punto principal *P*. Conocido el vértice *V* y su proyección en el plano de cuadro *P*, la distancia entre ellos determina *d*, y el plano de cuadro queda definido por ser perpendicular al vector *VP*.

Resultarían 8 parámetros, finalmente:

- 3 por las coordenadas del vértice: V_x, V_y, V_z.
- 3 por las coordenadas del punto principal: P_x, P_y, P_z.
- 2 por la traslación en el plano imagen: S_x, S_y.

15.3 Transformación inversa a la perspectiva

15.3.1 Planteando el problema

El problema de la restitución de perspectivas puede plantearse de la siguiente manera. Conocemos las coordenadas reales de **una serie de puntos de referencia**, así como las coordenadas planas de estos puntos en un sistema de referencia definido en la imagen.

No conocemos la posición del plano de cuadro, ni el origen o las direcciones principales del sistema de referencia definido en la imagen. Por tanto, lo único que conocemos de las referencias en la imagen es la posición relativa entre ellas (distancias y ángulos entre ellas).

Como hemos visto anteriormente, la perspectiva se caracteriza por 8 parámetros. Cada punto de referencia, de coordenadas conocidas tanto en la realidad como en la imagen, nos da 2 ecuaciones. Esto nos lleva a considerar que **necesitamos 4 puntos**.

Supongamos que tenemos esas 4 referencias y somos capaces de determinar los parámetros de la perspectiva: la posición del vértice, la posición del plano de cuadro.

El siguiente paso sería, dado un punto en el plano de cuadro, obtener la posición del punto en la realidad. Pero ese problema no tiene solución. Como se muestra en la figura, existen infinitos puntos A_i que tienen como punto imagen *A'*. Todos esos puntos

tienen en común que pertenecen a una recta que pasa por *V*. Por lo tanto, definen un espacio vectorial de dimensión 1.

Haría falta **otro parámetro adicional** para definir el problema completamente. Usualmente, se toma la cota del punto. Si conocemos la coordenada *z* de los puntos representados en la imagen, podemos realizar la transformación inversa a la perspectiva cónica.

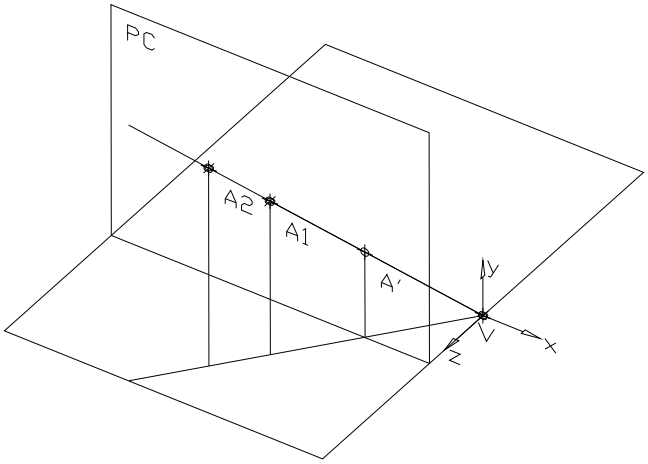


Figura 15-4. La transformación inversa a la perspectiva tiene múltiples soluciones

En restituciones de trayectorias de tráfico, lo que se suele hacer es restituir puntos sobre la superficie del pavimento. Si restituimos el punto de apoyo de las ruedas de un vehículo, conocemos perfectamente su posición.

Por tanto, la solución del problema está en la intersección de la recta *VA'* con la **superficie del pavimento**. Si consideramos el pavimento como una superficie plana de cota *Z*, el problema es más sencillo. Pero también podemos considerar el pavimento como una superficie topográfica compleja, y calcular exactamente la posición de la rueda. Para ello haría falta conocer esa superficie topográfica.

15.3.2 Resolución numérica

Anteriormente se ha definido la perspectiva cónica mediante dos funciones de la siguiente forma:

$$x_{proyección} = f_1\left[\{x,y,z\}_{real}, \{V_x,V_y,V_z\}, \{P_x,P_y,P_z\}, \{S_x,S_y\}\right]$$
$$y_{proyección} = f_2\left[\{x,y,z\}_{real}, \{V_x,V_y,V_z\}, \{P_x,P_y,P_z\}, \{S_x,S_y\}\right]$$

Si tenemos 4 puntos de los que conocemos $\{x,y,z\}_{real}, \{x,y\}_{proyección}$ podemos plantear un sistema de 8 ecuaciones no lineales, para calcular los 8 parámetros.

La resolución de **sistemas de ecuaciones no lineales** se realiza mediante métodos numéricos. El más conocido es el de Newton-Raphson.

Según este método, se parte de un valor inicial de las variables, y se van modificando éstos hasta conseguir que se satisfagan (aproximadamente) todas las ecuaciones.

Se planteó este sistema en el programa informático *Mathematica* ®, desarrollado por Wolfram Research. Se realizaron diferentes pruebas, planteando problemas sencillos de solución conocida.

El resultado fue que la **convergencia** no siempre fue buena, dependiendo mucho de los valores iniciales dados a las variables. Una de las características del método de Newton-Raphson es que es un **método sin garantía de éxito**. Si los valores iniciales de las variables no son buenos, puede no converger nunca.

Si se indican valores cercanos a los que son solución, hay más posibilidades de convergencia, pero tampoco hay garantía. Además, a priori es difícil estimar cuáles son esos valores.

Podría crearse una rutina que generase puntos iniciales aleatorios, dentro de un rango predeterminado, para repetir el cálculo en el caso de superar un límite de iteraciones. Si hay solución dentro de ese rango, este método la encuentra, aunque puede que tarde mucho tiempo.

Aunque existen muchas estrategias orientadas a evitar la no convergencia del método, se decidió que era recomendable encontrar un método con garantía de éxito, aunque fuese más complicado de implementar. Y, en efecto, ese método existe y se describe en las siguientes secciones.

15.4 La homología plana

15.4.1 Definición geométrica

Como se ha comentado anteriormente, el problema que queremos resolver sólo tiene solución si los puntos a restituir se encuentran sobre una superficie conocida. Supongamos que dichos puntos están sobre el plano horizontal. En ese caso, la transformación geométrica de la perspectiva se convierte en una **transformación de plano a plano**. Esto simplifica muchísimo el desarrollo, como se expone a continuación.

Volvamos a la definición de perspectiva cónica. Consideremos el vértice V, desde el cual se proyecta el triángulo sobre el plano del dibujo.

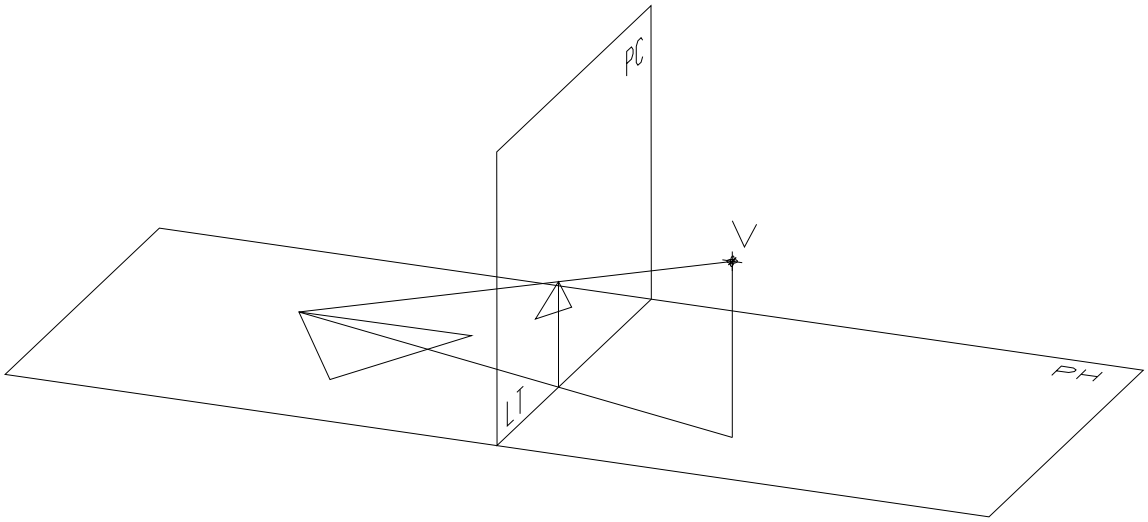


Figura 15-5. Perspectiva de un triángulo

Si abatimos el plano horizontal sobre el plano del cuadro, utilizando como charnela o eje de abatimiento la línea de tierra, conseguimos que todas las construcciones estén en el mismo plano.

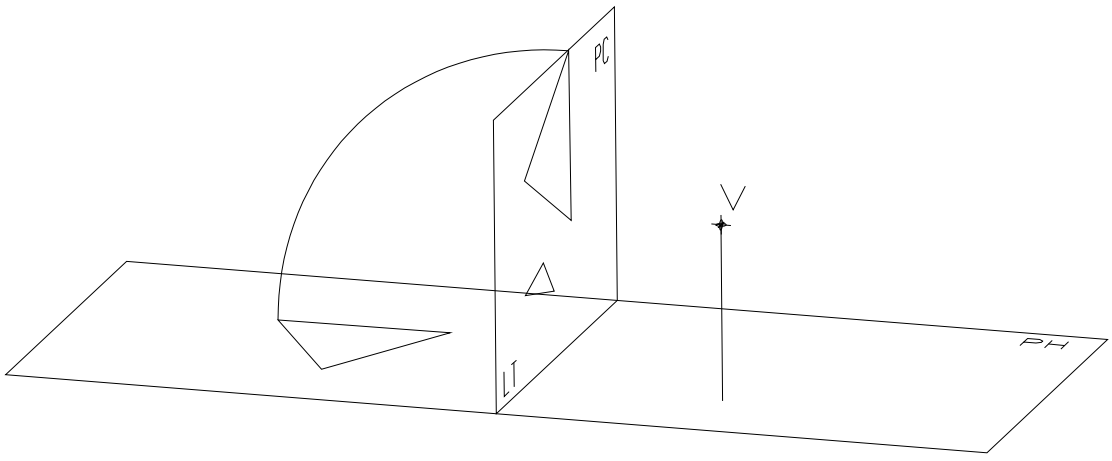


Figura 15-6. Abatimiento del plano horizontal sobre el plano de cuadro

Aplicamos entonces el **Teorema de Chasles-Steiner**: "establecida una perspectividad entre dos formas planas, al girar un plano sobre el otro, se conserva la perspectividad. Su centro *V*, se mueve en un plano perpendicular al eje de giro, describiendo una circunferencia cuyo centro está en la recta límite". Este teorema garantiza que las relaciones entre la figura real y su imagen siguen manteniéndose, después del giro. Además, indica cómo se mueve el vértice *V*.

La recta límite es aquella en la que se sitúan las proyecciones de los puntos del plano horizontal que están en el infinito. En el límite, los puntos del plano horizontal infinitamente alejados de *V*, tienen su imagen sobre la línea de horizonte. Como podemos recordar, el punto principal *P*, o proyección ortogonal de *V* sobre *PC*, pertenece a la línea

de horizonte. Por lo tanto, el centro del giro de V, según el Teorema de Chasles-Steiner, se encuentra sobre el punto principal.

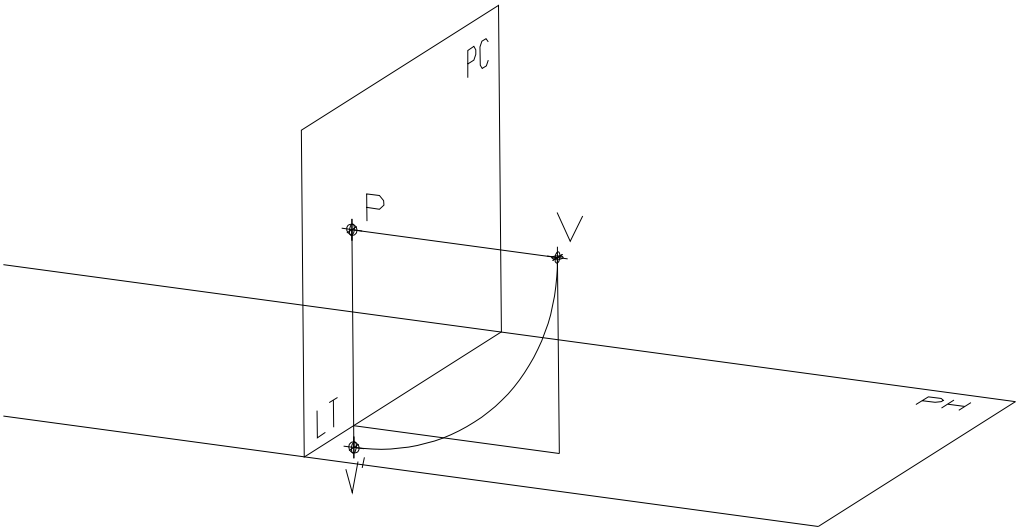


Figura 15-7. Abatimiento del vértice sobre el plano de cuadro

Después de estas operaciones, hemos conseguido pasar de un problema tridimensional a un problema plano. La perspectiva es ahora una **transformación plana**, una relación entre figuras del mismo plano, el plano de cuadro.

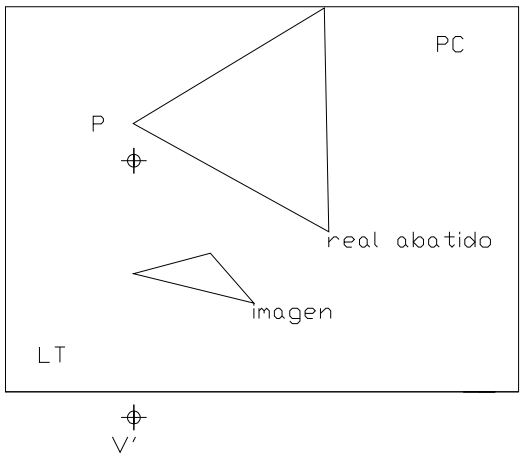


Figura 15-8. Perspectiva cónica reducida a transformación plana

Describiremos ahora las **características de esta transformación**:

- Se trata de una transformación plana, pues relaciona elementos pertenecientes al mismo plano.
- Se trata de una homografía o colinealidad, pues a cada punto se le hace corresponder otro punto, y a cada recta, otra recta.

- Hay una serie rectilínea invariante, la línea de tierra. Esta recta pertenece al plano horizontal y al plano de cuadro, por lo tanto, la transformada de ella es ella misma.
- Hay un haz de rectas invariante. Las rectas que parten del vértice son imágenes de sí mismas.

Por definición, estamos ante una **homología plana**. Enunciaremos ahora algunas propiedades que nos resultarán útiles:

- Un punto y su homólogo están alineados con V.
- Una recta y su homóloga se cortan en el eje.
- Las homólogas de dos rectas paralelas no son paralelas y se cortan en un punto de la recta límite.
- Hay dos rectas límites, una para las figuras originales y otra para las imágenes. La recta límite correspondiente a las imágenes es la línea de horizonte.

En el siguiente dibujo se muestra una aplicación clásica de la perspectiva cónica. Observamos cómo la imagen en perspectiva del rectángulo verde, es un cuadrilátero rojo en el que los lados no son paralelos. Las intersecciones de las rectas homólogas con la recta límite son los llamados "**puntos de fuga**".

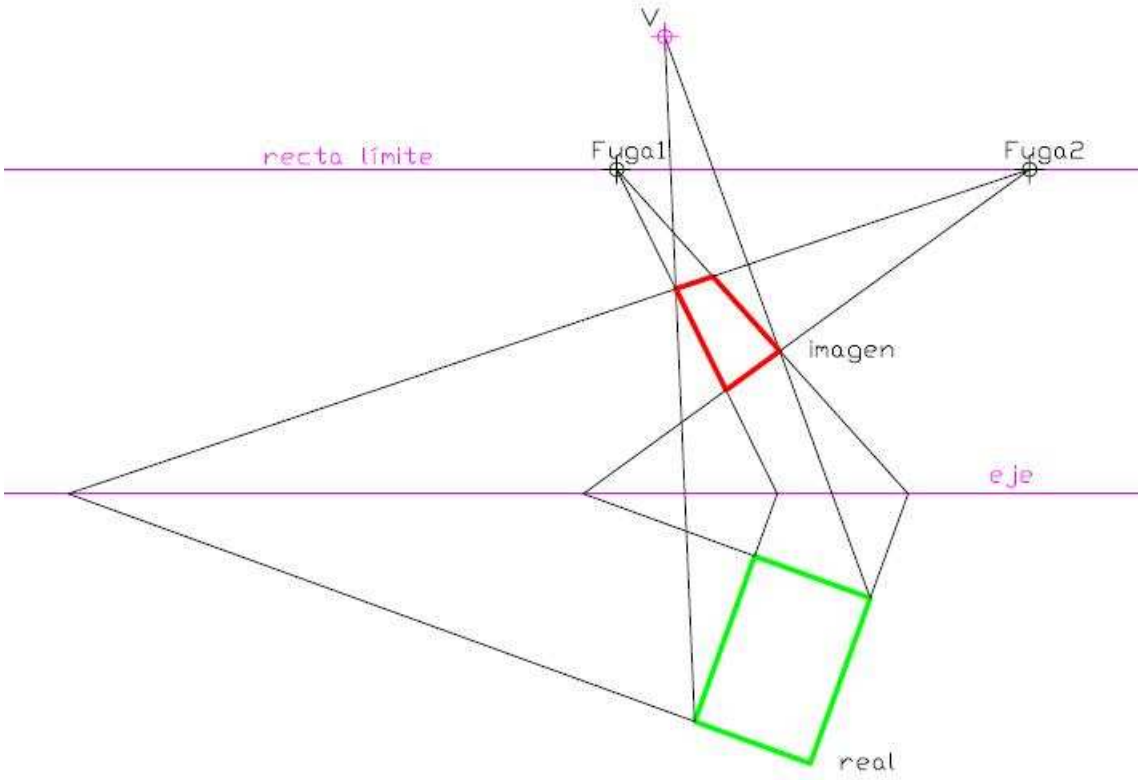


Figura 15-9. Los puntos de fuga en una homología plana

15.4.2 Expresiones algebraicas

Al igual que describimos la perspectiva tridimensional en función de expresiones algebraicas, mostraremos las ecuaciones que sirven para describir una homología.

Una **homografía plana**, como es una transformación lineal, puede describirse mediante la ecuación lineal siguiente:

$$\rho \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ \lambda \end{pmatrix}_{imagen} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ \lambda \end{pmatrix}_{real}$$

Debe cumplirse siempre que el determinante de la matriz a_{ij} sea distinto de cero. Esto garantiza que exista función inversa, con lo que a partir de las coordenadas de la imagen, pueden calcularse las del punto real.

Una homología es un tipo particular de homografía. Si el vértice es el origen de coordenadas, e imponemos los invariantes, se llega fácilmente a la siguiente expresión (Gil Saurí, 1997):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ \lambda \end{pmatrix}_{homología} = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{11} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ \lambda \end{pmatrix}_{real}$$

Si el vértice no es el origen, entonces hay que hacer previamente una **traslación**. La expresión matricial de una traslación, en coordenadas homogéneas en el plano es:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ \lambda \end{pmatrix}_{traslación} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -V_x \\ 0 & 1 & -V_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ \lambda \end{pmatrix}_{origen}$$

Si componemos ambas expresiones resulta:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ \lambda \end{pmatrix}_{homología} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & V_x \\ 0 & 1 & V_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{11} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & -V_x \\ 0 & 1 & -V_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ \lambda \end{pmatrix}_{real}$$

Que es una expresión de 6 parámetros. Se pueden obtener mediante el conocimiento de 3 puntos y sus homólogos. Efectivamente, conocer un triángulo y su homólogo permite determinar el vértice y el eje de homología fácilmente.

Operando, se llega a las siguientes expresiones:

$$x_{proy} = \frac{a_{11}(x - V_x) + V_x(a_{33} + a_{31}(x - V_x) + a_{32}(y - V_y))}{a_{33} + a_{31}(x - V_x) + a_{32}(y - V_y)}$$

$$y_{proy} = \frac{a_{11}(y - V_y) + V_y(a_{33} + a_{31}(x - V_x) + a_{32}(y - V_y))}{a_{33} + a_{31}(x - V_x) + a_{32}(y - V_y)}$$

Si consideramos que el origen de coordenadas del dibujo puede no coincidir con el del abatimiento del plano real, habría que considerar una **traslación** de coordenadas:

$$x_{proy} = \frac{a_{11}(x - V_x) + V_x(a_{33} + a_{31}(x - V_x) + a_{32}(y - V_y))}{a_{33} + a_{31}(x - V_x) + a_{32}(y - V_y)} + S_x$$

$$y_{proy} = \frac{a_{11}(y - V_y) + V_y(a_{33} + a_{31}(x - V_x) + a_{32}(y - V_y))}{a_{33} + a_{31}(x - V_x) + a_{32}(y - V_y)} + S_y$$

Estas dos expresiones, son de la forma:

$$x_{proy} = \frac{f_1 x + f_2 y + f_3}{h_1 x + h_2 y + h_3} + S_x = \frac{f(x,y)}{h(x,y)} + S_x$$

$$y_{proy} = \frac{g_1 x + g_2 y + g_3}{h_1 x + h_2 y + h_3} + S_y = \frac{g(x,y)}{h(x,y)} + S_y$$

Es decir, análogas a las expresiones obtenidas para la perspectiva tridimensional, aunque más sencillas.

Este tipo de expresiones son las utilizadas por Davis (2004), que a su vez las extrae de Bleyl (1976).

15.5 Homología inversa

15.5.1 Algebraicamente

El proceso para resolver el problema inverso numéricamente es análogo al caso tridimensional. Tenemos unas expresiones no lineales con 8 parámetros a determinar para definir la homología.

Si conocemos 4 puntos en sus coordenadas reales y del dibujo, podemos ser capaces de resolver el sistema de ecuaciones, calculando los 8 parámetros. La resolución, una vez más, debe realizarse por **métodos numéricos**.

Son aplicables aquí los comentarios acerca de la convergencia de estos métodos. Al no ser métodos con garantía de éxito, la resolución del problema puede complicarse.

15.5.2 Geométricamente

El problema inverso de homología consiste en determinar una homología que transforme una figura dada, en otra.

Dadas las coordenadas de 3 puntos y sus homólogos, es posible determinar la homología. Trazando rectas desde cada uno de sus puntos hacia sus homólogos, obtenemos tres rectas que se cruzan en un único punto: el vértice. Si extendemos los lados de los triángulos real y homológico, los puntos de corte pertenecen al eje de homología.

Si no conocemos la posición de uno de los triángulos, sino sólo su forma y dimensiones, el problema está indeterminado. Por ejemplo, podemos encontrar una homología que transforme un triángulo cualquiera en otro equilátero (o de forma arbitraria), pero el problema tiene múltiples soluciones.

Si en lugar de 3 vértices conocidos, son 4, el problema sí queda determinado.

La siguiente construcción permite **encontrar la homología que transforma un cuadrilátero cualquiera, en un rectángulo** (Gil Saurí, 1997). El cuadrilátero rojo está en la imagen y queremos que su homólogo real sea un rectángulo de dimensiones conocidas.

Como los lados opuestos del cuadrilátero, son paralelas en la realidad, se cortan en la recta límite. Los puntos *P*, *Q* de intersección de esas rectas definen la recta límite, en color morado.

Como los lados contiguos del cuadrilátero, son perpendiculares en la realidad, el vértice estará en el arco capaz de 90º del segmento *PQ*.

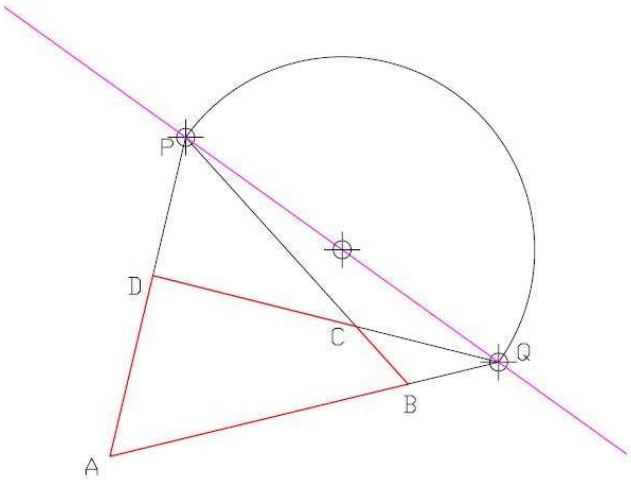


Figura 15-10. Transformación homológica de un cuadrilátero. Paso 1

Análogamente, las diagonales del rectángulo se cruzan con un ángulo que es conocido, pues conocemos su forma y dimensiones. En el caso de que el rectángulo sea cuadrado, ese ángulo es 90º. Así pues, el vértice debe estar en el arco capaz del segmento *MN*.

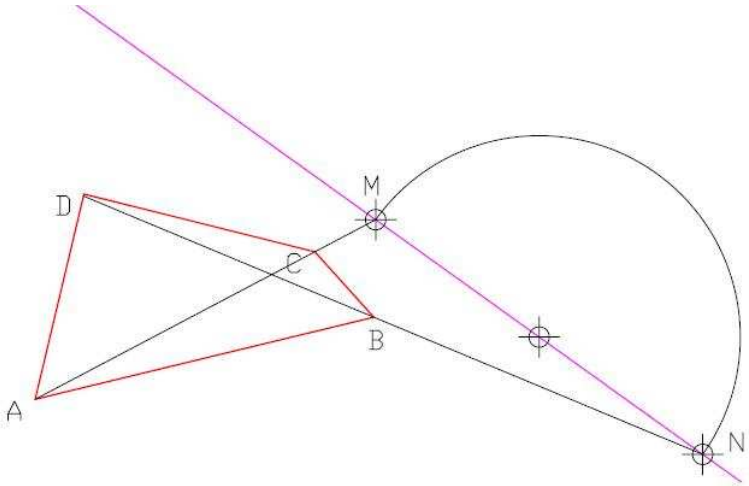


Figura 15-11. Transformación homológica de un cuadrilátero. Paso 2

Donde se corten los dos arcos capaces, tenemos la localización del vértice V. Trazando rectas desde *V* hasta *ABCD* tenemos las rectas sobre las que se sitúan los puntos homólogos *A'B'C'D'*. Tomamos una de las dimensiones conocidas del rectángulo, por ejemplo, el lado *A'B'*. Como ese lado es paralelo a *VQ*, podemos trazar una paralela a *VA*, para encontrar la posición de *B'*.

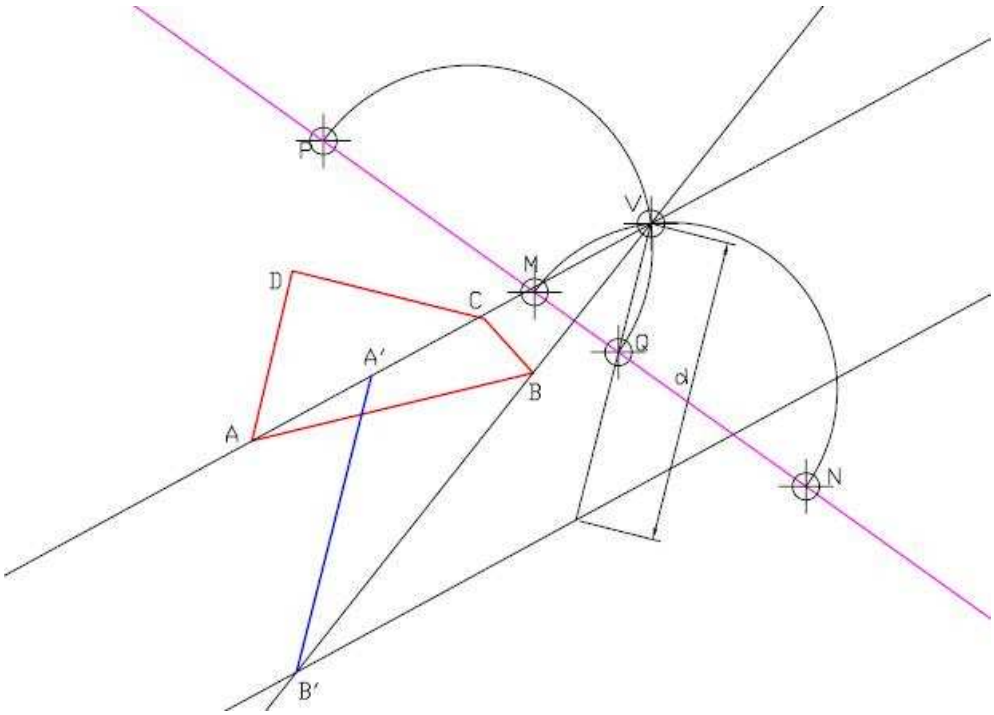


Figura 15-12. Transformación homológica de un cuadrilátero. Paso 3

El punto de corte de *AB* con *A'B'* es un punto del eje de homología. Como este eje es paralelo a la recta límite, queda perfectamente definido: es la línea verde.

Con el vértice y el eje de homología, ya se pueden calcular los demás puntos del rectángulo (en la figura, un cuadrado).

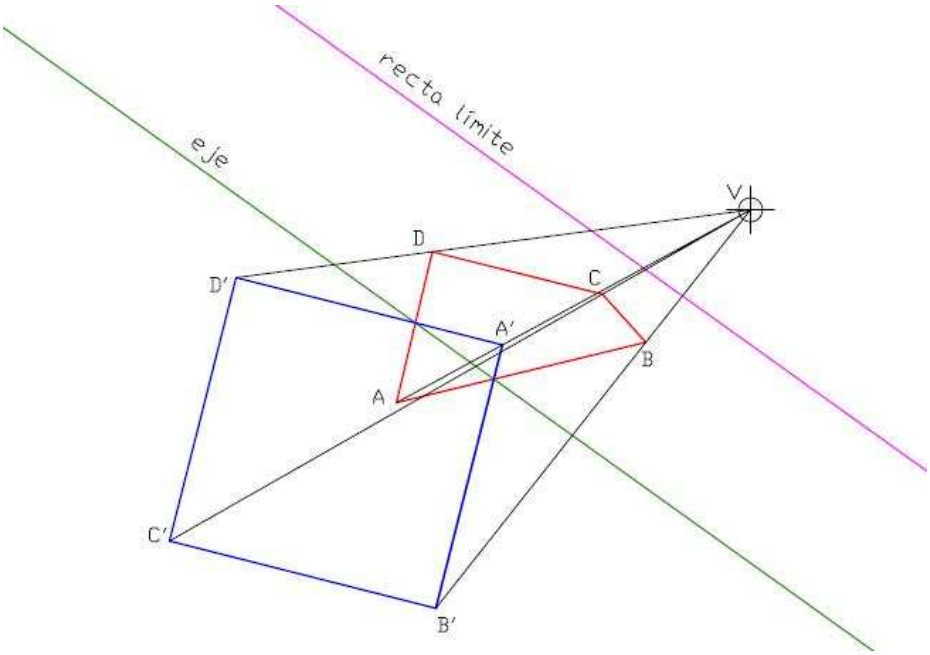


Figura 15-13. Transformación homológica de un cuadrilátero. Paso 4

Esta construcción es muy importante, pues permite definir la homología, si reconocemos en la imagen un rectángulo de dimensiones conocidas. **En una carretera existen multitud de rectángulos que pueden servir de referencia**. Por ejemplo, tomar un rectángulo definido por el ancho de un carril (en recta), y la distancia entre dos balizas consecutivas.

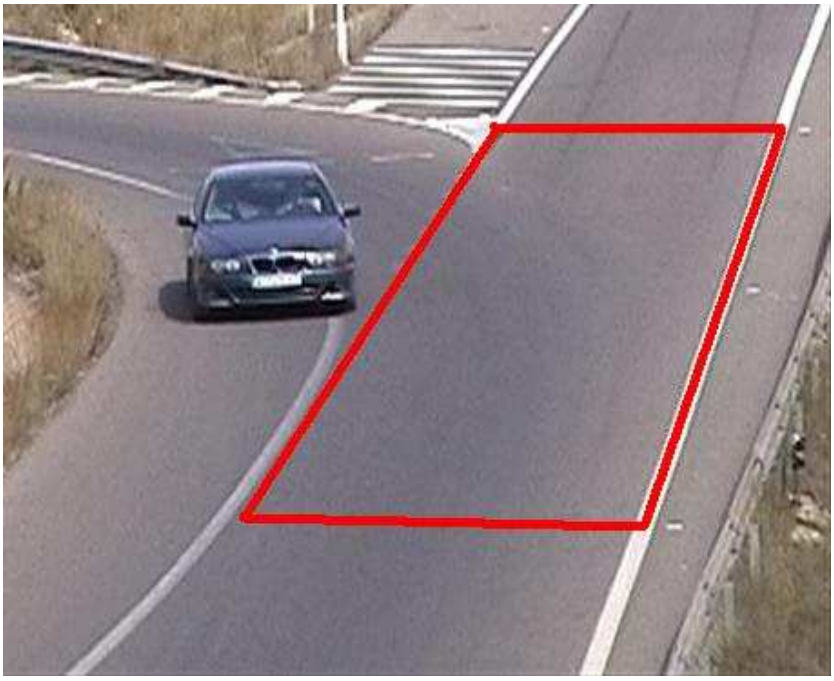


Figura 15-14. Ejemplo de rectángulo de referencia

15.5.3 Crítica del método

El método anteriormente descrito es realmente útil en la mayoría de los casos. Pero también tiene sus **inconvenientes**.

En primer lugar, nos obliga a localizar un rectángulo en la imagen real y puede ser que no exista ninguno. Pensemos en una carretera con un trazado muy curvo.

En segundo lugar, habría que comprobar, in situ, si los lados del rectángulo son realmente perpendiculares.

Por último, puede que los vértices del rectángulo no sean fácilmente identificables sobre la imagen. En el ejemplo anterior puede verse cómo los vértices de la derecha están sobre la línea, junto a las balizas retrorreflectantes. Pero los vértices de la izquierda están en puntos difícilmente distinguibles. Esto podría solventarse colocando sobre el pavimento una marca claramente visible desde la videocámara (por ejemplo, una cruz de pintura).

El método anterior puede suavizar sus condiciones de manera que también sirve un paralelogramo cualquiera (no necesariamente rectángulo). Sólo hay que variar los ángulos de los arcos capaces para determinar *V*.

La determinación de la homología que transforma un cuadrilátero cualquiera en otro de forma arbitraria no puede realizarse con variantes del método anterior.

15.6 La doble homología

15.6.1 Descripción del método

A continuación se describe el método utilizado en el presente trabajo. Se trata de una evolución del método utilizado por Romero y García (2005). Este método permite resolver los problemas del anterior, mediante la **concatenación de dos homologías**. Se define un dibujo intermedio o auxiliar, entre el real y la perspectiva cónica.

Al aumentar el número de incógnitas del problema, pero partiendo del mismo número de datos (4 referencias), se produce una indeterminación. Existen múltiples soluciones para el problema. Esto nos da libertad para escoger algunos de estos parámetros a nuestra elección, simplificando el problema.

Partimos de 4 puntos de coordenadas conocidas pertenecientes a la imagen, y las coordenadas de esos 4 puntos, en la realidad.

El segundo eje de homología, correspondiente a la relación entre la imagen y el auxiliar, se escoge de manera que pase por dos de las referencias: *A'B'*. Por lo tanto, la posición de *A''* y *B''* es conocida.

El primer eje de homología, correspondiente a la relación entre la realidad y el auxiliar, se escoge también pasando por dos puntos conocidos. Uno de ellos será el mismo que para el eje 2: *A*. El otro no puede ser *B*, sino *C* o *D*. Por ejemplo, hacemos que pase por *AD*.

Como *A* pertenece a los dos ejes de homología, *A=A'=A''*. En general, no será así, por lo que los puntos correspondientes a la realidad deberán desplazarse.

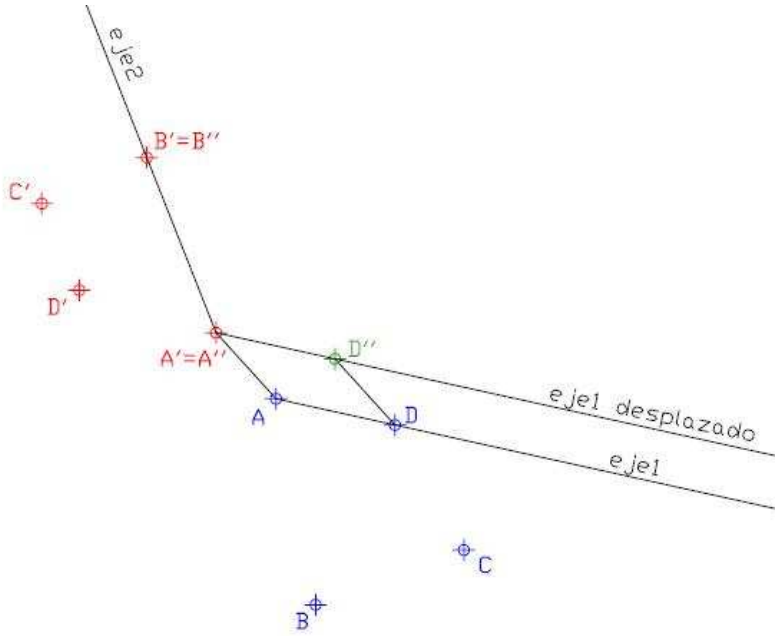


Figura 15-15. Doble homología. Paso 1

La línea que en la realidad pasa por *B* y *C* (o los dos puntos que hayan quedado separados de eje 1), la denominaremos línea libre. Podemos calcular su homóloga en el espacio auxiliar, puesto que conocemos *B''*.

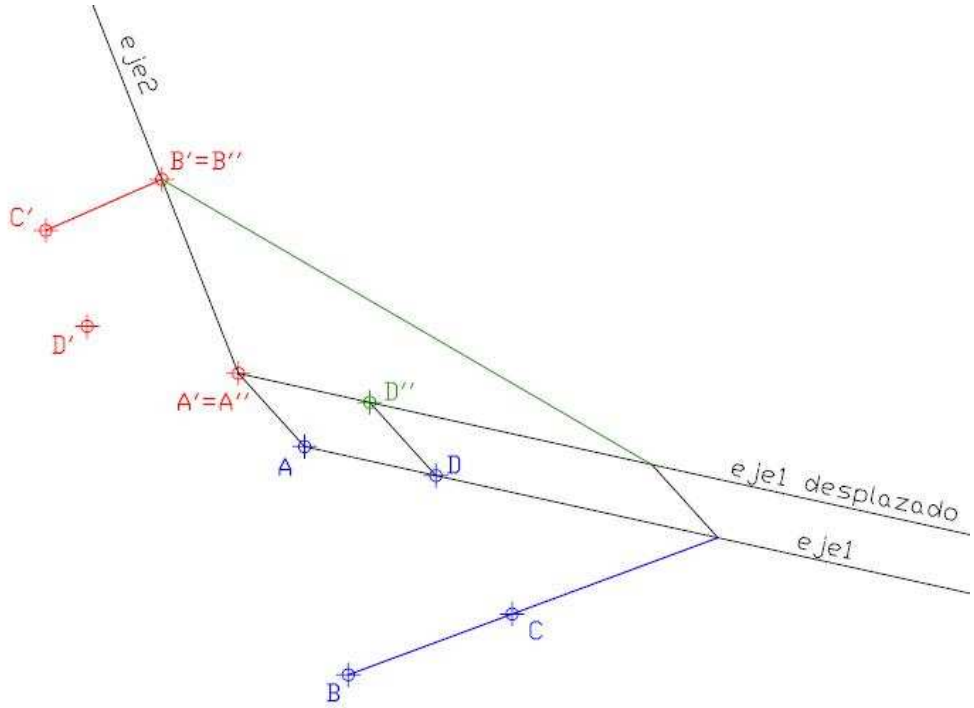


Figura 15-16. Doble homología. Paso 2

Por último, queda por determinar *C''*. A la línea que pasa por *CD* la denominaremos línea fija. El punto de corte con el eje 2 es un punto de la homóloga de esta línea en el espacio intermedio. En el dibujo, ese punto de corte se sale del papel. Otro punto de esta línea es *D''*. Por tanto, está determinada.

La intersección de la línea libre y la línea fija da como resultado *C''*.

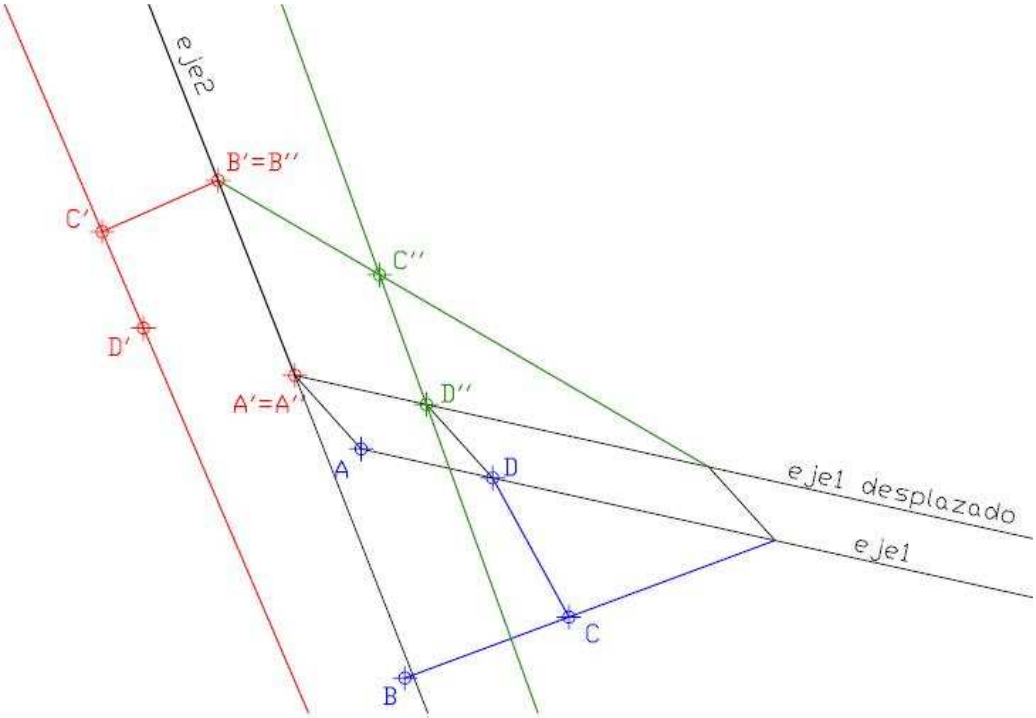


Figura 15-17. Doble homología. Paso 3

Las dos homologías han quedado definidas, puesto que conocemos 4 puntos en los tres espacios: real, intermedio e imagen.

No hemos determinado los vértices de ninguna de las dos homologías (aunque podríamos hacerlo). Por tanto, para calcular las coordenadas reales de algún punto, conocidas las de la imagen, nos apoyaremos en las referencias. Crearemos rectas hacia puntos conocidos, y calcularemos las homólogas de esas rectas.

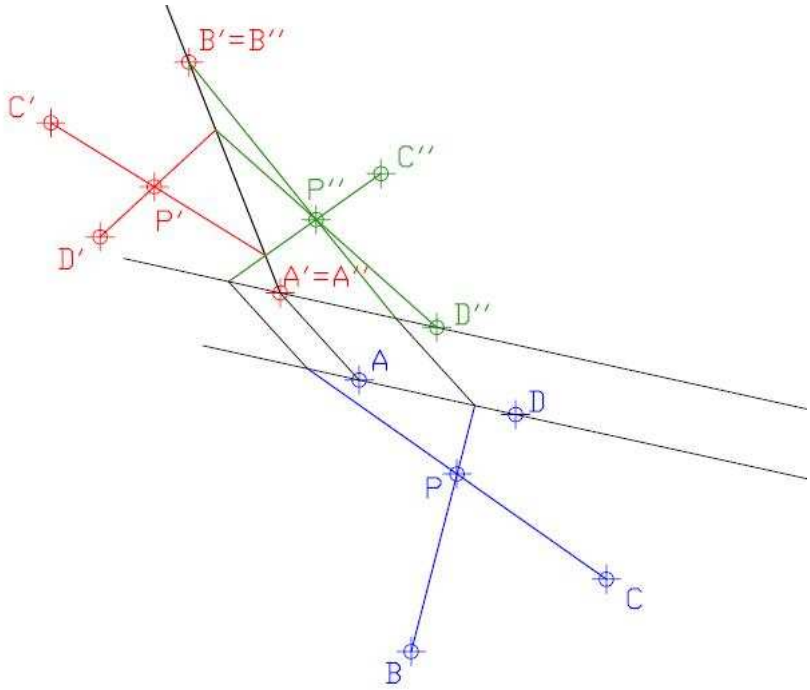


Figura 15-18. Ejemplo de cálculo de un punto

15.6.2 Justificación del método

Entre los puntos del espacio real y los del espacio imagen hay una relación lineal.

Una homología es una transformación lineal, por lo que, la concatenación de dos homologías también lo es.

Una traslación es otra transformación lineal, por lo que la concatenación de dos homologías y una traslación también lo es.

Hemos encontrado un producto de transformaciones lineales que consigue que 4 referencias del espacio real se transformen en 4 referencias de la imagen.

Como 4 referencias determinan el problema, haciendo que sólo haya una solución, la transformación encontrada es la solución. Y es aplicable al resto de puntos del espacio.

15.6.3 Caso particular del rectángulo

En el caso de considerar un rectángulo, el proceso es más elemental. Los puntos de fuga, que pertenecen a la recta límite, tienen sus homólogos en el infinito. La determinación de las dos homologías es inmediata, puesto que los ejes 1 y 2 coinciden con lados del rectángulo. El cálculo del homólogo de un punto cualquiera *P* también es más sencillo.

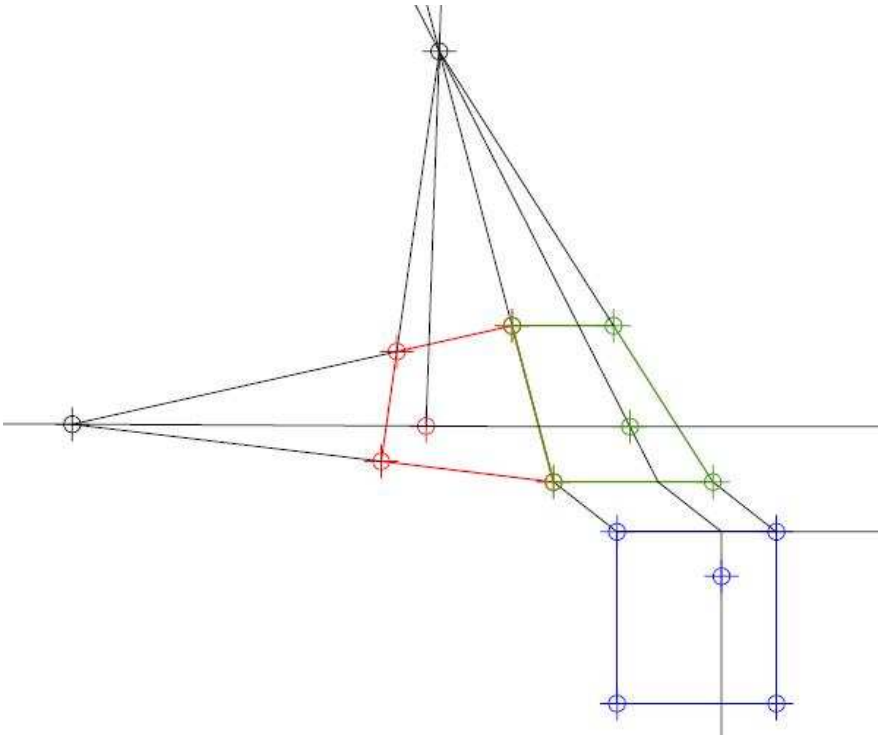


Figura 15-19. Caso particular del rectángulo

15.6.4 Precisión numérica

Este método es un método gráfico, pero que puede traducirse a expresiones de geometría analítica de manera sencilla. Este proceso fue llevado a cabo para su posterior implementación en un software para PC. Cada una de estas operaciones geométricas se tradujo a operaciones aritméticas básicas.

El método gráfico pierde precisión al tener que calcular la intersección entre dos rectas casi coincidentes. La traducción algebraica de estos procesos, aun siendo mucho más precisa que el uso de regla y compás, también pierde precisión en esos casos.

El procedimiento descrito no puede usarse en determinados casos que es necesario detectar. En concreto, no es aplicable cuando las referencias están alineadas entre sí. Si están casi alineadas, en teoría podría calcularse, pero aparecen errores de tipo numérico.

Tampoco puede calcularse si el eje 1 y el eje 2 son paralelos. Y aparecen errores numéricos si el eje 1 y el eje 2 se cortan con un ángulo cercano a cero. Para evitarlo, debe escogerse como punto perteneciente al eje 1, el más conveniente, de entre C y D.

Para calcular el homólogo de un punto, hemos descrito que se trazan rectas a puntos conocidos, se calculan las homólogas de estas rectas, y se calcula su intersección en el plano de homología. Si el punto está cercano a una de esas bases de apoyo, se producen errores numéricos, pues la recta queda indeterminada. En el caso límite, este procedimiento no es aplicable para calcular el homólogo de la base de apoyo. Para evitarlo, se tomarán puntos que queden fuera de la imagen tomada, como bases de apoyo, pues siempre estarán a cierta distancia de los puntos a restituir.

15.7 Conclusión

Obtener la posición, velocidad y aceleración adoptadas por un vehículo, a partir de una grabación de la trayectoria es un proceso geométrico-matemático complejo, pero abordable.

La grabación en video es una toma secuencial de fotografías (fotogramas) a intervalos de tiempo conocidos. La fotografía es un medio mecánico para obtener la perspectiva cónica de la realidad fotografiada. Por tanto, la restitución de fotografías consiste en una transformación geométrica inversa a la perspectiva cónica.

Este problema es, a priori, indeterminado, pero si consideramos que todos los puntos a restituir están en un plano de cota conocida (el pavimento de la carretera), el problema puede resolverse.

Existen dos familias de métodos alternativos. Por un lado podemos recurrir a métodos numéricos, pero se descartan por no tener garantía de éxito. Por el otro, podemos utilizar métodos geométricos, que siempre dan con la solución.

En este capítulo se ha realizado un desarrollo teórico que justifica la viabilidad del método y la validez de los resultados obtenidos con él.

En otro capítulo posterior se describe cómo este método quedó implementado en un programa informático con una interfaz gráfica amigable, que facilitara la tarea de restitución, y evitara tener que realizar, a mano, todos los cálculos geométricos para cada uno de los puntos a restituir.