



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**

**Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de  
Ingeniería de Minas**

**ANÁLISIS Y MEJORA DE INTERSECCIONES  
SEMAFORIZADAS EN MURCIA MEDIANTE EL CONTROL  
SEMAFÓRICO ACTUADO POR VEHÍCULOS**

---

**TRABAJO DE FIN DE MÁSTER**

**Autor: Francisco García Plaza**

**Directora: Dra. Dña. Pilar Jiménez Gómez**

**Octubre, 2018**



## *AGRADECIMIENTOS*

Me gustaría agradecer a todas las personas que, de una manera o de otra, han contribuido a la realización de este Trabajo Fin de Máster.

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi directora de Trabajo de Fin de Máster, la Dra. Dña. Pilar Jiménez Gómez, por su fantástica capacidad de dirección y orientación, su implicación y, sobre todo, su pasión por el trabajo que desempeña capaz de motivar a cualquier alumno.

De una manera muy especial quiero agradecerérselo a mi pareja, Júlia, por haber participado activamente en la toma de datos de campo, recordándome que debía continuar con este proyecto en los momentos más difíciles y animándome cuando no me salían las cosas a la primera. Sin ti nada de esto habría sido posible.

Y tampoco puedo olvidarme en este momento de mis padres, Paco y Rosario, por el apoyo que me han dado durante todo este tiempo que con este trabajo concluye.

De corazón, GRACIAS.



## **RESUMEN**

En este Trabajo de Fin de Máster se lleva a cabo un estudio de 3 intersecciones semaforizadas de diferente envergadura en la ciudad de Murcia.

En primer lugar, se realiza una introducción de lo que se pretende reducir mediante la mejora de los retrasos medios en las intersecciones, así como la manera de abordar este objetivo.

Posteriormente se presenta de manera teórica la metodología de cálculo del nivel de servicio en intersecciones semaforizadas del Manual de Capacidad Americano (Highway Capacity Manual) en su versión más reciente, la del 2010. En ella también se desarrollan los fundamentos teóricos de cálculo, así como las diferentes tablas, valores de los parámetros y formulas a emplear.

Tras esta parte dedicada al HCM, se encuentra un apartado dedicado al programa de simulación que va a usarse en este TFM, que en este caso es AnyLogic, pasando desde la historia de su creación a los diferentes enfoques de modelado que posee, como son la dinámica de sistemas, sistemas de eventos discretos y simulación basada en agentes.

Pasada esta parte teórica, se desarrolla el apartado práctico, aplicando el método del HCM a las 3 intersecciones objeto de estudio, obteniendo los niveles de servicio de cada intersección y calculando el retraso medio que posteriormente será usado como método de verificación.

A continuación, se crean modelos en AnyLogic que simulen el comportamiento de estas intersecciones, que se verifican con los resultados obtenidos anteriormente con el método del HCM. Una vez que los modelos están verificados, se procede a optimizar el tiempo y la secuencia de las fases de los semáforos de las intersecciones tal y como lo harían los semáforos actuados por el tráfico.

Finalmente se exponen las conclusiones a las que se han llegado al realizar este proceso y se plantean 3 líneas de trabajo futuras relacionadas con el presente trabajo.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. OBJETIVOS.....	24
2. INTRODUCCIÓN .....	27
¿Por qué usar un modelado de simulación?.....	31
¿Cuáles son las ventajas de utilizar software de modelización como AnyLogic? .....	32
3. MARCO TEÓRICO.....	35
3.1. Introducción al método del hcm 2010 .....	35
3.1.1. Visión general del método.....	36
3.1.1.1. Límites del análisis .....	37
3.1.1.2. Nivel de análisis.....	37
3.1.1.3. Periodo de estudio y periodo de análisis .....	38
3.1.1.4. Medidas del funcionamiento de la intersección .....	40
3.1.1.5. Modos de desplazamiento .....	41
3.1.1.6. Grupos de carriles y grupos de movimiento .....	42
3.1.1.7. Movimientos y numeración de fases .....	42
3.1.2. Criterio de nivel de servicio .....	45
3.1.2.1. Automóviles.....	46
3.1.2.2. Peatones y bicicletas .....	48
3.1.3. Datos de entrada necesarios .....	49
3.1.3.1. Automóviles.....	49
3.1.3.1.1. Datos de las características del tráfico .....	52
3.1.3.1.2. Datos geométricos.....	60
3.1.3.1.3. Datos de la señalización.....	61
3.1.3.1.4. Otros datos .....	65
3.1.3.2. Modos no motorizados .....	68
3.1.3.2.1. Datos de características del tráfico .....	69

3.1.3.2.2.	Datos geométricos.....	72
3.1.3.2.3.	Datos de la señalización.....	73
3.1.4.	Ámbito de aplicación del método.....	74
3.1.5.	Limitaciones del método .....	75
3.1.5.1.	Automóviles.....	76
3.1.5.2.	Modos no motorizados .....	76
3.2.	Metodología de cálculo del hcm.....	77
3.2.1.	Visión general .....	77
3.2.2.	Automóviles .....	77
3.2.2.1.	Estructura de cálculo .....	78
3.2.2.2.	Extensión a múltiples periodos.....	117
3.2.2.3.	Interpretación de resultados.....	118
3.3.	Anylogic .....	120
3.3.1.	Historia de AnyLogic .....	120
3.3.2.	Enfoques de modelado de AnyLogic .....	122
3.3.2.1.	Modelado de eventos discretos.....	122
3.3.2.2.	Modelado de dinámica de sistemas .....	123
3.3.2.3.	Modelado basado en agentes .....	126
3.3.2.4.	Modelado de simulación multimétodo .....	128
4.	INTERSECCIONES OBJETO DE ESTUDIO .....	132
4.1.	Intersección N°1.Era alta .....	134
4.1.1.	Introducción .....	134
4.1.2.	Herramientas empleadas para el cálculo .....	136
4.1.3.	Datos obtenidos durante el aforo.....	140
4.1.4.	Aplicación del método del HCM a la intersección n°1. ....	145
	Estudio del acceso Sur. Calle Mayor .....	145
	Estudio del acceso Oeste. Calle Dr. Tomás Pellicer Frutos .....	158

Estudio del acceso Norte. Avenida de Era Alta.....	164
Estudio del acceso Este. Camino Hondo.....	170
Estudio conjunto de la intersección nº1.....	176
Conclusiones sobre la intersección nº1.....	177
4.2. Intersección nº2. av. ciudad de almería con carril cascales.....	178
4.2.1. Introducción.....	178
4.2.2. Herramientas empleadas para el cálculo.....	180
4.2.3. Datos obtenidos durante el aforo.....	183
4.2.4. Aplicación del método del HCM a la intersección nº2.....	187
Estudio del acceso Este. Av. Ciudad de Almería.....	187
Estudio del acceso Oeste. Av. Ciudad de Almería.....	195
Estudio del acceso Norte. Carril Cascales.....	199
Estudio conjunto de la intersección nº2.....	204
Conclusiones sobre la intersección nº2.....	205
4.3. Intersección nº3. c/ torre de romo con c/ mozart y c/ alameda de los capuchinos	206
4.3.1. Introducción.....	206
4.3.2. Herramientas empleadas para el cálculo.....	209
4.3.3. Datos obtenidos durante el aforo.....	215
4.3.4. Aplicación del método del HCM a la intersección nº3.....	219
Estudio del Acceso Noreste. Calle Mozart.....	219
Estudio del acceso Noroeste. Calle Torre de Romo.....	236
Estudio del acceso Sureste. Calle Torre de Romo.....	241
Estudio conjunto de la intersección nº3.....	249
Conclusiones sobre la intersección nº3.....	250
5. PROPUESTAS DE MEJORA.....	253
5.1. Intersección nº1.....	253

5.2. Conclusiones de la intersección nº1. ....	260
5.3. Intersección nº2 .....	261
5.4. Conclusiones de la intersección nº2. ....	268
5.5. Intersección nº3 .....	269
5.6. Conclusiones de la intersección nº3. ....	280
6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS .....	283
Bibliografía.....	286

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Intersección semaforizada en Murcia. Vista aérea. Fuente: Google Earth	27
Ilustración 2. Contaminación en la ciudad de Madrid. Fuente: El mundo.es.....	28
Ilustración 3. Portadas de Manuales de Capacidad. ....	30
Ilustración 4. Entorno de trabajo AnyLogic. Fuente: www.AnyLogic.com .....	31
Ilustración 5. Entorno de trabajo Vissim. Fuente: www.traffic-inside.com.....	31
Ilustración 6. Diferencias entre una intersección tipo americana y una española. ....	37
Ilustración 7. Posibles enfoques del estudio. Fuente: HCM 2010.....	39
Ilustración 8. Esquema de movimientos y numeración en intersecciones. Fuente: HCM 2010 .....	43
Ilustración 9. Estructura de fase de doble anillo. Fuente: HCM 2010.....	44
Ilustración 10. Movimiento de peatones y geometría de una esquina de intersección. Fuente: HCM 2010 .....	71
Ilustración 11. Esquema de trabajo del método para automóviles. Fuente: HCM 2010	79
Ilustración 12. Combinaciones usuales de grupos de carriles y de movimiento. Fuente: HCM 2010 .....	82
Ilustración 13. Fases durante operación accionada. Fuente HCM 2010 .....	100

Ilustración 14. Polígono de acumulación de colas con dos ratios de salidas. Fuente: HCM 2010 .....	104
Ilustración 15. Llegadas y salidas acumuladas en periodo sobresaturado. Fuente: HCM 2010 .....	107
Ilustración 16. Cola inicial con demanda mayor que capacidad. Fuente: HCM 2010 .	108
Ilustración 17. Cola inicial con demanda menor que capacidad. Fuente: HCM 2010 .	109
Ilustración 18. Cola inicial con eliminación de cola en el ciclo. Fuente: HCM 2010 ..	109
Ilustración 19. Polígono de cálculo de retraso uniforme. Fuente: HCM 2010.....	110
Ilustración 20. Dinámica del sistema: comercialización y cuota de mercado. Fuente: <a href="http://www.Anylogic.com">www.Anylogic.com</a> .....	124
Ilustración 21 Ejemplos de retroalimentación y dinámica del sistema. Fuente: <a href="http://www.Anylogic.com">www.Anylogic.com</a> .....	124
Ilustración 22.Modelo de simulación de dinámica de sistemas. Fuente: <a href="http://www.Anylogic.com">www.Anylogic.com</a> .....	126
Ilustración 23. Modelado de simulación basado en agentes. Fuente: <a href="http://www.Anylogic.com">www.Anylogic.com</a> . .....	127
Ilustración 24. Métodos de modelado de simulación. Fuente: <a href="http://www.Anylogic.com">www.Anylogic.com</a> ....	129
Ilustración 25. Producción, distribución y modelo de mercado. Fuente: <a href="http://www.Anylogic.com">www.Anylogic.com</a> .....	130
Ilustración 26. Croquis intersección nº1. Fuente: Elaboración propia .....	136
Ilustración 27. Fase 1 de la intersección nº 1. Fuente: Elaboración propia .....	137
Ilustración 28. Fase 2 de la intersección nº1. Fuente: Elaboración propia .....	138
Ilustración 29. Croquis completo intersección nº1. Fuente: Elaboración propia .....	144
Ilustración 30. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº1. Acceso Sur. Fuente: Elaboración propia.....	157

Ilustración 31. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº1. Acceso Oeste. Fuente: Elaboración propia.....	163
Ilustración 32. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº1. Acceso Norte. Fuente: Elaboración propia.....	169
Ilustración 33. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº1. Acceso Este. Fuente: Elaboración propia.....	175
Ilustración 34. Croquis intersección nº2. Fuente: Elaboración propia .....	180
Ilustración 35. Fase 1 de la intersección nº2. Fuente: Elaboración propia .....	181
Ilustración 36. Fase 2 de la intersección nº2. Fuente: Elaboración propia .....	182
Ilustración 37. Croquis completo intersección nº2. Fuente: Elaboración propia .....	186
Ilustración 38. Intersección nº2. Acceso Este. Fuente: Elaboración propia .....	188
Ilustración 39. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº2. Acceso Este. Grupo de carriles 1. Fuente: Elaboración propia .....	191
Ilustración 40. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº2. Acceso Este. Grupo de carriles 2. Fuente: Elaboración propia .....	194
Ilustración 41. Intersección nº2. Acceso Oeste. Fuente: Elaboración propia.....	196
Ilustración 42. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº2. Acceso Oeste. Fuente: Elaboración propia.....	198
Ilustración 43. Intersección nº2. Acceso Norte. Fuente: Elaboración propia .....	200
Ilustración 44. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº2. Acceso Norte. Fuente: Elaboración propia.....	203
Ilustración 45. Croquis intersección nº3. Fuente: Elaboración propia .....	209
Ilustración 46. Fase 1 de la intersección nº3. Fuente: Elaboración propia .....	210
Ilustración 47. Fase 2 de la intersección nº3. Fuente: Elaboración propia .....	211
Ilustración 48. Fase 3 de la intersección nº3. Fuente: Elaboración propia .....	212

Ilustración 49. Croquis completo intersección n°3. Fuente: Elaboración propia .....	218
Ilustración 50. Intersección n°3. Acceso Noreste. Fuente: Elaboración propia.....	220
Ilustración 51. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección n°3. Acceso Noreste. Fuente: Elaboración propia .....	225
Ilustración 52. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección n°3. Acceso Noreste. Grupo de carriles 2. Fuente: Elaboración propia .....	231
Ilustración 53. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección n°3. Acceso Noreste. Grupo de carriles 3. Fuente: Elaboración propia .....	235
Ilustración 54. Intersección n°3. Acceso Noroeste. Fuente: Elaboración propia.....	237
Ilustración 55. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección n°3. Acceso Noroeste. Fuente: Elaboración propia .....	240
Ilustración 56. Intersección n°3. Acceso Sureste. Fuente: Elaboración propia .....	242
Ilustración 57. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección n°3. Acceso Sureste. Grupo de carriles 1. Fuente: Elaboración propia .....	244
Ilustración 58. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección n°3. Acceso Sureste. Grupo de carriles 2. Fuente: Elaboración propia .....	248
Ilustración 59. Representación gráfica del modelo de la intersección n°1 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.....	254
Ilustración 60. Diagrama de flujo del modelo de la intersección n°1 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.....	255
Ilustración 61. Simulación del modelo de la intersección n°1 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.....	256
Ilustración 62. Mapa de densidad de la intersección n°1 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.....	257

Ilustración 63. Gráfico comparativo entre la situación actual y la optimizada en la intersección n°1. Fuente: Elaboración propia .....	260
Ilustración 64. Representación gráfica del modelo de la intersección n°2 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.....	261
Ilustración 65. Diagrama de flujo del modelo de la intersección n°2 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.....	262
Ilustración 66. Mapa de densidad de la intersección n°2 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.....	263
Ilustración 67. Representación gráfica del modelo de la intersección n°2 con intersección adicional en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia. ....	264
Ilustración 68. Experimento de optimización de la intersección n°2 con intersección adicional.....	265
Ilustración 69. Gráfico comparativo de las distintas situaciones de la intersección n°2. Fuente: Elaboración propia.....	268
Ilustración 70. Representación gráfica del modelo de la intersección n°3 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.....	269
Ilustración 71. Diagrama de flujo del modelo de la intersección n°3 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.....	270
Ilustración 72. Mapa de densidad de la intersección n°3 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.....	271
Ilustración 73. Experimento de optimización de la intersección n°3.....	272
Ilustración 74. Experimento de optimización de la intersección n°3 con nueva secuencia de fases. ....	274
Ilustración 75. Experimento de optimización de la intersección n°3 con aumento de intensidad de tráfico.....	276

Ilustración 76. Experimento de optimización de la intersección n°3 con aumento de intensidad de tráfico (2).....	277
Ilustración 77. Experimento de optimización de la intersección n°3 con aumento de intensidad de tráfico (3).....	278
Ilustración 78. Gráfico comparativo de las distintas situaciones de la intersección n°3. Fuente: Elaboración propia.....	280
Ilustración 79. Gráfico comparativo de las distintas situaciones con aumento de la intensidad de tráfico de la intersección n°3. Fuente: Elaboración propia.....	281

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Niveles de servicio para automóviles. Fuente: HCM 2010.....	48
Tabla 2. Niveles de servicio para peatones y bicicletas. Fuente: HCM 2010.....	48
Tabla 3. Datos de entrada necesarios para controles preprogramados, totalmente accionados o semiaccionados.....	51
Tabla 4. Datos de entrada adicionales necesarios para el control coordinado-accionado.....	51
Tabla 5. Calidad de la progresión en función del coeficiente de grupo. Fuente: HCM 2010.....	55
Tabla 6. Datos de entrada necesarios para el método de peatones y bicicletas.....	69
Tabla 7. Factor de ajuste por ancho de carril. Fuente HCM 2010.....	85
Tabla 8. Niveles de servicio. Automóviles. Fuente: HCM 2010.....	117
Tabla 9. Planilla para determinación de fases. Fuente. Elaboración propia.....	138
Tabla 10. Planilla de aforo 1. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia.....	139
Tabla 11. Planilla de aforo 2. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia.....	139
Tabla 12. Planilla de aforo 3. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia.....	139

Tabla 13. Planilla de aforo 4. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia.....	140
Tabla 14. Fases de señalización de la intersección nº1. Fuente: Elaboración propia ...	141
Tabla 15. Datos planilla de aforo 1. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia .....	142
Tabla 16. Datos planilla de aforo 2. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia .....	142
Tabla 17. Datos planilla de aforo 3. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia .....	142
Tabla 18. Datos planilla de aforo 4. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia .....	143
Tabla 19. Datos sobre la señalización. Acceso Sur. Grupo de carriles 1. ....	156
Tabla 20. Datos sobre demanda. Acceso Sur. Grupo de carriles 1.....	156
Tabla 21. Datos para retraso incremental. Intersección nº1. Acceso Sur. ....	157
Tabla 22. Resumen resultados. Acceso Sur. Intersección nº1 .....	158
Tabla 23. Datos sobre la señalización. Acceso Oeste. Grupo de carriles 1 .....	162
Tabla 24. Datos sobre demanda. Acceso Oeste. Grupo de carriles 1 .....	163
Tabla 25. Datos para retraso incremental. Intersección nº1. Acceso Oeste. ....	164
Tabla 26. Resumen resultados. Acceso Oeste. Intersección nº1 .....	164
Tabla 27. Datos sobre la señalización. Acceso Norte. Grupo de carriles 1 .....	168
Tabla 28. Datos sobre demanda. Acceso Norte. Grupo de carriles 1 .....	169
Tabla 29. Datos para retraso incremental. Intersección nº1. Acceso Norte .....	170
Tabla 30. Resumen resultados. Acceso Norte. Intersección nº1 .....	170
Tabla 31. Datos sobre la señalización. Acceso Este. Grupo de carriles 1 .....	174
Tabla 32. Datos sobre demanda. Acceso Este. Grupo de carriles 1 .....	174
Tabla 33. Datos para retraso incremental. Intersección nº1. Acceso Este.....	175
Tabla 34. Resumen resultados. Acceso Este. Intersección nº1.....	176
Tabla 35. Retraso medio. Intersección nº1 .....	177
Tabla 36. Retraso ponderado. Intersección nº1 .....	177
Tabla 37. Planilla para determinación de fases. Fuente: Elaboración propia.....	182

Tabla 38. Planilla de aforo 1. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia.....	183
Tabla 39. Planilla de aforo 2. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia.....	183
Tabla 40. Planilla de aforo 3. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia.....	183
Tabla 41. Planilla de aforo 4. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia.....	183
Tabla 42. Fases de señalización de la intersección n°2. Fuente: Elaboración propia ...	184
Tabla 43. Datos planilla de aforo 1. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia .....	185
Tabla 44. Datos planilla de aforo 2. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia .....	185
Tabla 45. Datos planilla de aforo 3. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia .....	185
Tabla 46. Datos planilla de aforo 4. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia .....	185
Tabla 47. Datos sobre la señalización. Acceso Este. Grupo de carriles 1 .....	190
Tabla 48. Datos sobre demanda. Acceso Este. Grupo de carriles 1 .....	191
Tabla 49. Datos para retraso incremental. Intersección n°2. Grupo de carriles 1. Acceso Este .....	191
Tabla 50. Resumen resultados. Acceso Este. Grupo 1. Intersección n°2 .....	192
Tabla 51. Datos sobre la señalización. Acceso Este. Grupo de carriles 2 .....	194
Tabla 52. Datos sobre demanda. Acceso Este. Grupo de carriles 2 .....	194
Tabla 53. Datos para retraso incremental. Intersección n°2. Grupo de carriles 2. Acceso Este .....	195
Tabla 54. Resumen resultados. Acceso Este. Grupo 2. Intersección n°2 .....	195
Tabla 55. Datos sobre la señalización. Acceso Oeste.....	197
Tabla 56. Datos sobre demanda. Acceso Oeste.....	197
Tabla 57. Datos para retraso incremental. Intersección n°2. Acceso Oeste .....	198
Tabla 58. Resumen resultados. Acceso Oeste. Intersección n°2 .....	199
Tabla 59. Datos sobre la señalización. Acceso Norte.....	202
Tabla 60. Datos sobre demanda. Acceso Norte.....	203

Tabla 61. Datos para retraso incremental. Intersección n°2. Acceso Norte .....	203
Tabla 62. Resumen resultados. Acceso Norte. Intersección n°2 .....	204
Tabla 63. Retraso medio. Intersección n°2 .....	205
Tabla 64. Retraso ponderado. Intersección n°2 .....	205
Tabla 65. Planilla para determinación de fases. Fuente: Elaboración propia .....	212
Tabla 66. Planilla de aforo 1. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia.....	213
Tabla 67. Planilla de aforo 2. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia.....	213
Tabla 68. Planilla de aforo 3. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia.....	213
Tabla 69. Planilla de aforo 4. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia.....	214
Tabla 70. Planilla de aforo 5. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia.....	214
Tabla 71. Planilla de aforo 6. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia.....	214
Tabla 72. Planilla de aforo 7. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia.....	214
Tabla 73. Fases de señalización de la intersección n°3. Fuente: Elaboración propia...	215
Tabla 74. Datos planilla de aforo 1. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia .....	216
Tabla 75. Datos planilla de aforo 2. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia .....	216
Tabla 76. Datos planilla de aforo3. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia .....	216
Tabla 77. Datos planilla de aforo 4. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia .....	216
Tabla 78. Datos planilla de aforo 5. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia .....	217
Tabla 79. Datos planilla de aforo 6. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia .....	217
Tabla 80. Datos planilla de aforo 7. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia .....	217
Tabla 81. Datos sobre la señalización. Acceso Noreste. Grupo de carriles 1. ....	225
Tabla 82. Datos sobre la demanda. Acceso Noreste. Grupo de carriles 1.....	225
Tabla 83. Datos para retraso incremental. Intersección n°3. Acceso Noreste. Grupo de carriles 1 .....	226

Tabla 84. Resumen resultados. Acceso Noreste. Grupo de carriles 1. Intersección nº3 .....	227
Tabla 85. Datos sobre la señalización. Acceso Noreste. Grupo de carriles 2. ....	231
Tabla 86. Datos sobre la demanda. Acceso Noreste. Grupo de carriles 2.....	231
Tabla 87. Datos para retraso incremental. Intersección nº3. Acceso Noreste. Grupo de carriles 2 .....	232
Tabla 88. Resumen resultados. Acceso Noreste. Grupo de carriles 2. Intersección nº3 .....	233
Tabla 89. Datos sobre la señalización. Acceso Noreste. Grupo de carriles 3. ....	234
Tabla 90. Datos sobre la demanda. Acceso Noreste. Grupo de carriles 3.....	235
Tabla 91. Datos para retraso incremental. Intersección nº3. Acceso Noreste. Grupo de carriles 3 .....	236
Tabla 92. Resumen resultados. Acceso Noreste. Grupo de carriles 3. Intersección nº3 .....	236
Tabla 93. Datos para el cálculo del flujo de saturación ajustado. Intersección nº3. Acceso Noroeste. Grupo de carriles 1 .....	238
Tabla 94. Datos sobre la señalización. Acceso Noroeste. Grupo de carriles 1. ....	239
Tabla 95. Datos sobre la demanda. Acceso Noroeste. Grupo de carriles 1.....	239
Tabla 96. Datos para retraso incremental. Intersección nº3. Acceso Noroeste. Grupo de carriles 1 .....	240
Tabla 97. Resumen resultados. Acceso Noroeste. Grupo de carriles 1. Intersección nº3 .....	241
Tabla 98. Datos para el cálculo del flujo de saturación ajustado. Intersección nº3. Acceso Sureste. Grupo de carriles 1.....	242
Tabla 99. Datos sobre la señalización. Acceso Sureste. Grupo de carriles 1. ....	244

Tabla 100. Datos sobre la demanda. Acceso Sureste. Grupo de carriles 1. ....	244
Tabla 101. Datos para retraso incremental. Intersección nº3. Acceso Sureste. Grupo de carriles 1 .....	245
Tabla 102. Resumen resultados. Acceso Sureste. Grupo de carriles 1. Intersección nº3 .....	245
Tabla 103. Datos para el cálculo del flujo de saturación ajustado. Intersección nº3. Acceso Sureste. Grupo de carriles 2.....	246
Tabla 104. Datos sobre la señalización. Acceso Sureste. Grupo de carriles 2. ....	247
Tabla 105. Datos sobre la demanda. Acceso Sureste. Grupo de carriles 2. ....	247
Tabla 106. Datos para retraso incremental. Intersección nº3. Acceso Sureste. Grupo de carriles 2 .....	248
Tabla 107. Resumen resultados. Acceso Sureste. Grupo de carriles 2. Intersección nº3 .....	249
Tabla 108. Retraso medio. Intersección nº3 .....	250
Tabla 109. Retraso ponderado. Intersección nº3 .....	250
Tabla 110. Tiempo en el sistema de la intersección nº1.....	257
Tabla 111. Fases de señalización de la intersección nº1. Fuente: Elaboración propia .	258
Tabla 112. Fases de señalización optimizadas de la intersección nº1. Fuente: Elaboración propia .....	258
Tabla 113. Tiempo en el sistema optimizado de la intersección nº1.....	259
Tabla 114. Fases de señalización de la intersección nº2. Fuente: Elaboración propia .	262
Tabla 115. Tiempo en el sistema de la intersección nº2.....	263
Tabla 116. Tiempo en el sistema de la intersección nº2 con intersección adicional. ....	265
Tabla 117. Fases de señalización optimizados de la intersección nº2 con intersección adicional. Fuente: Elaboración propia .....	266

Tabla 118. Tiempo en el sistema optimizado de la intersección n°2 con intersección adicional.....	266
Tabla 119. Tiempo en el sistema optimizado de la intersección n°2 con intersección adicional optimizada.....	267
Tabla 120. Tiempo en el sistema de la intersección n°3.....	271
Tabla 121. Secuencia de fases en la intersección n°3. Fuente: Elaboración propia. ....	272
Tabla 122. Nueva secuencia de fases en la intersección n°3. Fuente: Elaboración propia. ....	272
Tabla 123. Tiempo en el sistema de la intersección n°3 optimizada. ....	273
Tabla 124. Cambio en la secuencia de fases en la intersección n°3. Fuente: Elaboración propia.....	273
Tabla 125. Valores del cambio en la secuencia de fases en la intersección n°3. Fuente: Elaboración propia.....	274
Tabla 126. Tiempo en el sistema con la nueva secuencia de fases de la intersección n°3 optimizada. ....	275
Tabla 127. Secuencia de fases en la intersección n°3 con aumento de intensidad de tráfico. Fuente: Elaboración propia.....	276
Tabla 128. Tiempo en el sistema de la intersección n°3 con aumento de tráfico optimizada. ....	276
Tabla 129. Secuencia de fases en la intersección n°3 con aumento de intensidad de tráfico (2). Fuente: Elaboración propia. ....	277
Tabla 130. Tiempo en el sistema de la intersección n°3 con aumento de tráfico (2) optimizada. ....	278
Tabla 131. Secuencia de fases en la intersección n°3 con aumento de intensidad de tráfico (3). Fuente: Elaboración propia. ....	279

Tabla 132. Tiempo en el sistema de la intersección nº3 con aumento de tráfico (3) optimizada. ....	279
--	-----

## **ÍNDICE DE IMÁGENES**

Imagen 1. Localización de las intersecciones. Fuente: Google Earth .....	133
Imagen 2. Vista aérea de la intersección nº 1. Fuente: Google Earth.....	134
Imagen 3. Intersección nº1. Acceso Sur. Fuente: Elaboración propia.....	146
Imagen 4. Intersección nº1. Acceso Oeste. Fuente: Elaboración propia .....	159
Imagen 5. Intersección nº1. Acceso Norte. Fuente: Elaboración propia .....	165
Imagen 6. Intersección nº1. Acceso Este. Fuente: Elaboración propia .....	171
Imagen 7. Vista aérea de la intersección nº2. Fuente: Google Earth.....	179
Imagen 8. Vista aérea intersección nº3. Fuente: Google Earth .....	207



# **CAPÍTULO 1. OBJETIVOS**

## 1. **OBJETIVOS**

En el presente Trabajo Fin de Master (en adelante TFM) se describe y aplica el método propuesto por el Manual de Capacidad Americano para evaluar y calificar 3 intersecciones de distinta envergadura en la ciudad de Murcia, una vez estudiado el nivel de servicio de la intersección en su totalidad e identificado los posibles aspectos en los que se puede mejorar, se realizará un modelo de las mismas para simular su situación actual con los datos tomados en campo y una situación en la que se haya mejorado los aspectos en los que se considere que pueden optimizarse.

En la red viaria de las zonas urbanas, las intersecciones semaforizadas cumplen un papel primordial en la regulación del tránsito, pues de su adecuado funcionamiento dependen la seguridad, movilidad y eficiencia de la circulación. El objetivo principal de este TFM es reducir los tiempos de espera improductivos que ocurren en las intersecciones semaforizadas, problema que se abordará mediante la implantación de semáforos actuados por el tráfico que acude a ellos.

Para poder optimizar una intersección se pueden utilizar distintas funciones a minimizar como pueden ser: la longitud de las colas que se forman en los semáforos, la cantidad de vehículos en el peor de los casos, el tiempo de demora o espera, etc. Con ello conseguiremos:

- Reducir y prevenir cierto tipo de accidentes en la intersección y en las intersecciones colindantes.
- Reducir las demoras que experimentan los peatones y los vehículos al intentar cruzar la intersección, y al mismo tiempo evitar los obstáculos en las intersecciones más cercanas causado por largas colas.
- Reducir el consumo de combustible de los vehículos en las intersecciones.
- Reducir la emisión de contaminantes a la atmósfera.

Para ello se verá cómo se comentó anteriormente, el método de evaluación y calificación propuesto por el Manual de Capacidad Americano `` *Highway Capacity Manual* `` en su versión más reciente, la del año 2010 (en adelante HCM) para entender los elementos y parámetros que influyen en una intersección semaforizada y posteriormente se utilizará

un programa de simulación, que, en este caso particular, será el programa AnyLogic, por ser un software de simulación libre. Mediante este programa se realizarán modelos para simular posibles situaciones con la intención de reducir los tiempos de espera medios de las intersecciones objeto de estudio.

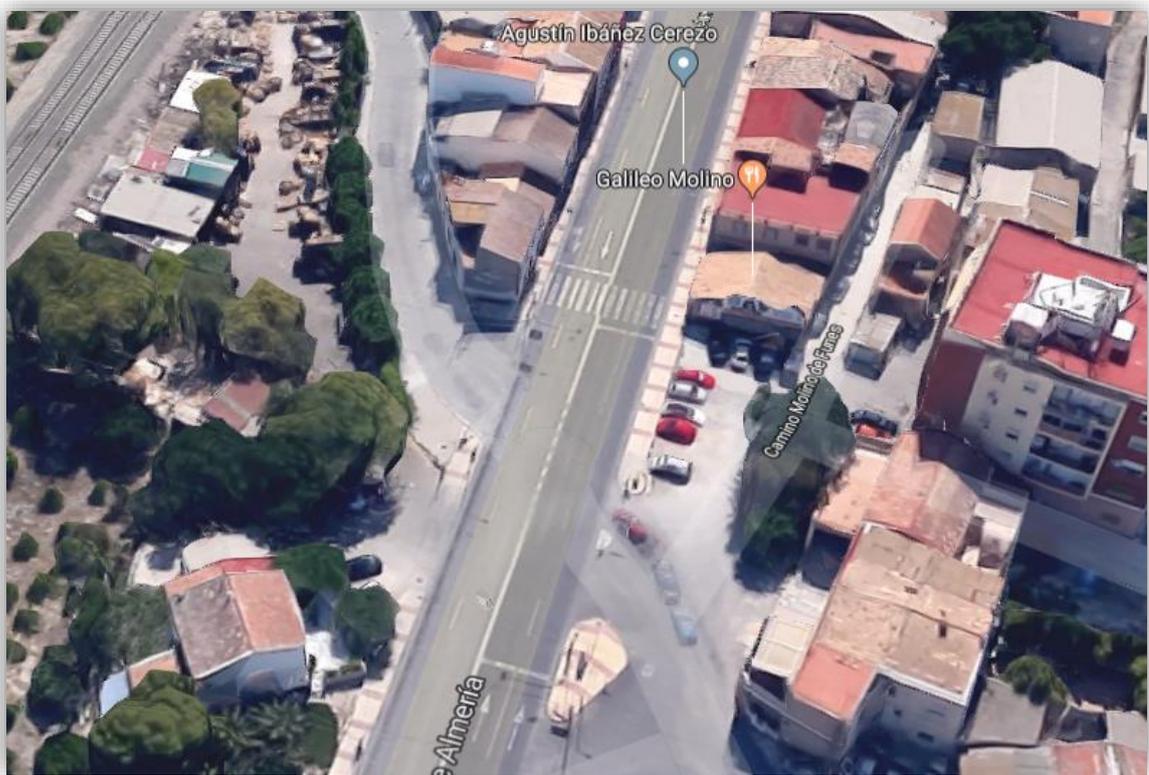
## **CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN**

## 2. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la congestión de tráfico es un problema muy grave para la sociedad, que se presenta en la mayoría de las ciudades desarrolladas del mundo, dado que causa problemas tanto económicos como medioambientales, de hecho, de media, una persona pasa 6 meses de su vida esperando en un semáforo en rojo.

Su resolución es una constante preocupación para las administraciones públicas, para la cual se buscan alternativas al igual que la construcción de nuevas infraestructuras como puentes, túneles, etc.

Uno de los elementos principales dentro de la gestión del tráfico urbano es el correcto funcionamiento de los semáforos que regulan las intersecciones viales.



*Ilustración 1. Intersección semaforizada en Murcia. Vista aérea. Fuente: Google Earth*

La función primordial de los semáforos en el control de una intersección es dar el paso alternativamente a los distintos grupos de vehículos, peatones, bicicletas y/u otro sistema de transporte, de tal manera que éstos puedan pasar a través de la intersección con un mínimo de riesgos y demoras.

Como ya se comentó en los objetivos de este TFM, los semáforos en una intersección deben:

- Reducir y prevenir cierto tipo de accidentes en la intersección y en las intersecciones colindantes.
- Reducir las demoras que experimentan los peatones y los vehículos al intentar cruzar la intersección, y al mismo tiempo evitar los obstáculos en las intersecciones más cercanas causado por largas colas.
- Reducir el consumo de combustible de los vehículos en las intersecciones.
- Reducir la emisión de contaminantes a la atmósfera.



*Ilustración 2. Contaminación en la ciudad de Madrid. Fuente: El mundo.es*

Un mal funcionamiento o falta de optimización de los tiempos de los ciclos en los semáforos puede hacer que estos objetivos no se cumplan, un ejemplo de esto es el caso en el que un conductor observa que se encuentra sólo en una intersección semaforizada, y no hay ningún vehículo atravesándola, es capaz de saltarse el semáforo y sin darse cuenta causar un accidente por colisión lateral y poner en riesgo su vida y la de las personas que van en el otro vehículo. Además, cuando se está esperando en el semáforo también se están emitiendo contaminantes a la atmósfera que podrían ser evitados y consumiendo combustible que podría ser ahorrado si el semáforo estuviera mejor optimizado.

Para que los objetivos mencionados se cumplan, es necesario sincronizar el ciclo de los semáforos, es decir, la secuencia de estados (rojo, ámbar y verde) por la que pasan los semáforos y que se repite de manera cíclica, o como en este trabajo se pretende, variar

los tiempos de estas fases para ajustarse al tráfico de vehículos que acceden a las intersecciones.

Este ciclo de los semáforos se debe estudiar desde 3 puntos de vista distintos:

- 1) **La longitud en tiempo del ciclo completo de los semáforos**, es decir, el tiempo necesario para que se dé una sucesión completa de indicaciones en los semáforos conectados a un mismo regulador. Independientemente de lo que resulte de los cálculos, la duración del ciclo debe estar forzosamente comprendida entre los límites que fija la psicología del conductor. La práctica indica que ciclos menores de 35 segundos o mayores de 120 se acomodan difícilmente a la mentalidad del usuario de la vía pública [Sánchez-Toscano Babero, J. (2003)].
- 2) **El porcentaje de tiempo dedicado para cada una de las fases**, es decir, el porcentaje de tiempo dedicado a cada una de las combinaciones de indicaciones que permiten uno o varios movimientos simultáneos a través de la intersección.
- 3) **Las transiciones entre semáforos consecutivos**. Un ejemplo típico de esta circunstancia es la presencia de dos semáforos consecutivos en una avenida, en este caso se define el tiempo de transición (offset time) como el tiempo desde que un semáforo pasa a estado verde hasta que el siguiente semáforo de la avenida pasa también a verde.

Para sincronizar de forma óptima los ciclos de los semáforos, se han empleado diversas técnicas matemáticas, que van desde la programación matemática con restricciones de equilibrio [de Schutter, B. y de Moor, B. (1998)] útiles para la realización de análisis estratégicos del tráfico, hasta las técnicas de optimización aplicadas a modelos de simulación [Wiering, et al. (2004)]. Además de estas técnicas matemáticas existen trabajos que han basado su funcionamiento en diferentes técnicas de soft-computing [Lim, et al. (2001)]. En el campo del control borroso se han definido diferentes alternativas, estableciendo como variables de entrada la densidad de tráfico y la velocidad de los vehículos durante el estado verde del semáforo y como salida el tiempo que debe durar cada uno de los estados dentro del ciclo del semáforo [López, et al. (2007)]. Dentro del ámbito de las soluciones evolutivas destaca el trabajo presentado por [Sánchez, et al. (2008)] en el que se presenta una arquitectura basada en algoritmos genéticos que optimiza de forma adaptativa los ciclos de los semáforos. En [Lema, et al. (2009)] se desarrolla un problema de regulación del tráfico a través del ajuste de los ciclos de los

semáforos (problema en el que existen dos fases en cada ciclo), proponiéndose para su solución un método híbrido que combina una metaheurística tipo recocido simulado para calcular una buena aproximación de la solución, que luego será mejorada con un algoritmo quasi-Newton para problemas de optimización no suaves.

En este TFM se abordará un problema de regulación de tráfico a través del ajuste de los ciclos de los semáforos (problema en el que existen tres fases en cada ciclo), para 3 tipos de intersecciones diferentes, proponiendo para su resolución un sistema semaforizado actuado por el tráfico de vehículos que acceden a ellos mediante el programa AnyLogic, que nos permitirá conocer la duración óptima de estas 3 fases del ciclo en función de los vehículos que entren en la intersección.

Para evaluar la situación inicial de los diversos casos prácticos utilizaremos el procedimiento desarrollado en el HCM en su versión de 2010, el cual podemos decir que es el método por excelencia a partir del cual otros países han realizado adaptaciones para incluir sus condiciones particulares de tráfico, como el German Highway Capacity Manual de Alemania, el Austroads Guide to Traffic Management de Australia y Nueva Zelanda, el Indonesian Highway Capacity Manual de Asia o el Nordic Highway Capacity Manual de Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suecia.



*Ilustración 3. Portadas de Manuales de Capacidad.*

Además, se han implementado estos métodos de estudio de tráfico en programas informáticos incluyéndoles software de optimización, algunos de ellos son: Sidra Intersection, Vissim, Aimsun, Transcad o el propio AnyLogic que utilizaremos en este TFM.

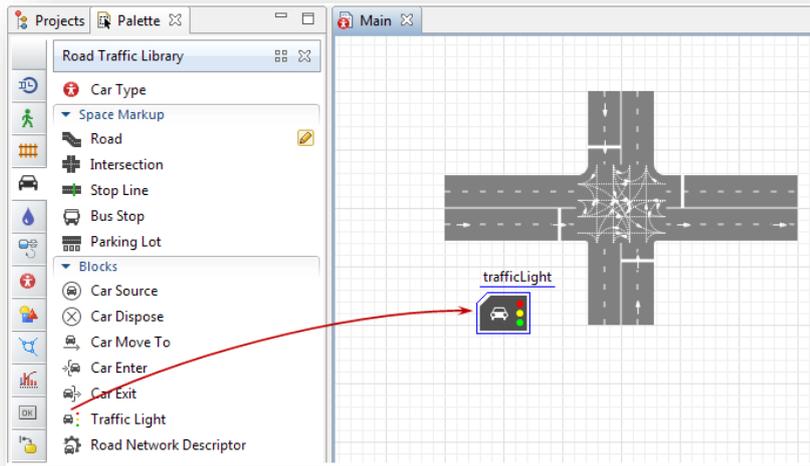


Ilustración 4. Entorno de trabajo AnyLogic. Fuente: [www.AnyLogic.com](http://www.AnyLogic.com)



Ilustración 5. Entorno de trabajo Vissim. Fuente: [www.traffic-inside.com](http://www.traffic-inside.com)

## ¿Por qué usar un modelado de simulación?

El modelado de simulación resuelve problemas del mundo real de manera segura y eficiente. Proporciona un importante método de análisis que se verifica, comunica y comprende fácilmente. En todas las industrias y disciplinas, el modelado de simulación proporciona soluciones valiosas al proporcionar una visión clara de los sistemas complejos.

La simulación permite la experimentación en una representación digital válida de un sistema. A diferencia del modelado físico, como hacer una copia en escala de un edificio, el modelado de simulación se basa en computadora y usa algoritmos y ecuaciones. El software de simulación proporciona un entorno dinámico para el análisis de modelos de computadora mientras se están ejecutando, incluida la posibilidad de verlos en 2D o 3D.

Los usos de la simulación en los negocios son variados y a menudo se utilizan cuando la realización de experimentos en un sistema real es imposible o poco práctica, a menudo por el costo o el tiempo, como en el caso que concierne a este TFM, ya que es más sencillo simular lo que pasaría si se cambiase la duración de las fases en una intersección semaforizada, que imponerlo en la situación real.

La capacidad de analizar el modelo mientras se ejecuta establece un modelo de simulación aparte de otros métodos, como los que usan Excel o la programación lineal. Al poder inspeccionar los procesos e interactuar con un modelo de simulación en acción, tanto la comprensión como la confianza se construyen rápidamente.

## **¿Cuáles son las ventajas de utilizar software de modelización como**

### **AnyLogic?**

#### **1. Entorno libre de riesgos**

El modelado de simulación proporciona una forma segura de probar y explorar diferentes escenarios de "y si" como, por ejemplo, el efecto de cambiar la duración de la fase verde en una intersección semaforizada, nos permite tomar la decisión correcta antes de hacer cambios en el mundo real.

#### **2. Ahorrar dinero y tiempo**

Los experimentos virtuales con modelos de simulación son menos costosos y toman menos tiempo que los experimentos con activos reales. La implantación de una intersección compuesta por semáforos accionados por el tráfico puede probarse sin desmantelar los semáforos colocados actualmente o gastar dinero innecesariamente.

#### **3. Visualización**

Los modelos de simulación se pueden animar en 2D / 3D, permitiendo que los conceptos e ideas se verifiquen, comuniquen y comprendan más fácilmente. Los

analistas e ingenieros obtienen confianza en un modelo al verlo en acción y pueden demostrar claramente los hallazgos a la gerencia.

#### **4. Visión de la dinámica**

A diferencia del análisis basado en una hoja de cálculo o un solucionador, el modelado de simulación permite la observación del comportamiento del sistema a lo largo del tiempo, en cualquier nivel de detalle. Por ejemplo, comprobar el tiempo que se encuentra un vehículo en la intersección.

#### **5. Mayor precisión**

Un modelo de simulación puede capturar muchos más detalles que un modelo analítico, proporcionando una mayor precisión y un pronóstico más preciso. Los semáforos accionados por el tráfico pueden adaptar la duración de sus fases para reducir el tiempo de espera de los vehículos.

#### **6. Manejar la incertidumbre**

La incertidumbre en los tiempos de operación y el resultado se puede representar fácilmente en los modelos de simulación, lo que permite la cuantificación del riesgo y encontrar soluciones más robustas. En logística, se puede producir una imagen realista utilizando simulación, incluidos datos impredecibles, como los plazos de entrega del envío.

## **CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO**

### **3. MARCO TEÓRICO.**

En este apartado se pretende exponer, con la mayor claridad posible, las características y los conceptos desarrollados por el método propuesto por el HCM para llevar a cabo el cálculo de los niveles de servicio de las intersecciones semaforizadas. Se pasará por una serie de subapartados, entre los que se pueden encontrar una introducción al método en la que se conocerán desde los límites del propio método y los criterios de evaluación que se emplean hasta los valores de entrada necesarios, o una explicación de la propia metodología de cálculo seguida, en la que se desarrollarán los tres métodos de análisis disponibles desde el punto de vista teórico con la explicación de sus ecuaciones.

Cabe decir que el desarrollo de estos apartados corresponde a la estructura seguida por el HCM en su capítulo 18, incluyendo la información relativa a otros conceptos dentro de dicha estructura.

Además, se incluye una descripción de la metodología heurística, metaheurística, del reconocido simulado, de la metaheurística basada en reconocido simulado para llegar al algoritmo basado en reconocido simulado para el problema de sincronización de semáforos.

#### **3.1. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DEL HCM 2010**

El manual de capacidad americano del año 2010 recoge la metodología empleada para el diseño y explotación de las intersecciones semaforizadas en su capítulo 18, y como ya se ha señalado en el apartado de objetivos, se basa en las intersecciones con control de señalización mediante detectores de tráfico, si bien se dan las claves para poder aplicar dicho procedimiento a las intersecciones con señalización mediante tiempos fijos, o preprogramadas, caso mayoritario en las intersecciones españolas.

Así, en el presente apartado se muestra en detalle tanto la metodología descrita en el capítulo 18 para evaluar la capacidad y la calidad del servicio prestado a los usuarios de las intersecciones, como los diferentes aspectos relacionados con dicha metodología, como pueden ser el área de la intersección a la cual se puede aplicar el análisis, los tiempos durante los cuales se han de tomar datos o los criterios empleados una vez que se han determinado los resultados para llegar a conclusiones aceptables, entre otros.

Del mismo modo, es importante destacar que el método recogido en el HCM mide el rendimiento de la intersección desde el punto de vista de todos los usuarios, es decir, no solo de los vehículos a motor, sino también de los peatones y de las bicicletas. Por tanto, una vez realizadas las diferentes medidas, el analista será capaz de detectar los problemas en los que se incurra y podrá plantear soluciones a fin de mejorar las anomalías que se detecten.

### **3.1.1. Visión general del método**

El método de cálculo del HCM se emplea para intersecciones de 3 o 4 ramas, formadas por el cruce de dos calles, donde la señalización actúa de manera independiente a la de otras intersecciones cercanas. No obstante, la posible influencia que ciertas intersecciones anteriores tengan sobre la que se esté estudiando se puede incluir en el modelo mediante una serie de datos de partida.

Además, es importante tener en cuenta que la metodología de cálculo está basada en las clásicas intersecciones americanas urbanas de grandes dimensiones, en las cuales se produce el cruce de una calle principal y una secundaria mediante 4 ramas, formando ángulos de 90 grados entre ellas, con amplias aceras en las que los peatones han de esperar su turno para cruzar y con posibilidad de aparición de carriles exclusivos para bicicletas. Este escenario es bastante inusual en España, donde es mucho más habitual la existencia de intersecciones de pequeño tamaño, con aceras de dispares dimensiones y ramas de acceso no ortogonales.

No obstante, el modelo americano de intersección se puede encontrar también en nuestro país, pero normalmente en intersecciones de las zonas más modernas de las ciudades, las cuales hayan sido desarrolladas bajo planes urbanísticos recientes. Este hecho supone una razón de peso para pensar que un método alternativo a éste podría ser conveniente a la hora de aplicarse sobre intersecciones en España, principalmente sobre aquellas que se sitúan en áreas urbanas tradicionales, siendo este uno de los motivos por los que se ha desarrollado el presente TFM.

Las diferencias entre las intersecciones ideales de la metodología y las tradicionales españolas expuestas en los párrafos anteriores se pueden observar con claridad en la ilustración 6.



*Ilustración 6. Diferencias entre una intersección tipo americana y una española.*

### **3.1.1.1. Límites del análisis**

Abordando el tema de los límites geométricos del análisis a realizar, se debe resaltar que éstos no están definidos como una distancia fija para todas las intersecciones, sino que dependen de la propia intersección objeto de estudio. Así, las zonas a analizar deberán tener la longitud suficiente como para incluir la zona de influencia en cada una de las ramas de la intersección, así como la distancia que pueda ocupar la mayor cola prevista en caso de retención. Por tanto, los límites del análisis han de ser establecidos por el sujeto que realice el estudio en relación a la propia intersección y a la situación que se presente durante el periodo de análisis que se esté estudiando.

No obstante, por defecto el área de influencia se extenderá, como mínimo, 76 metros por detrás de la línea de parada de la intersección en cada una de sus ramas de acceso.

### **3.1.1.2. Nivel de análisis**

El HCM diferencia entre tres niveles de análisis, de mayor a menor exactitud:

- Análisis operacional
- Análisis de diseño
- Análisis de planificación

El **análisis operacional** supone la aplicación más detallada del procedimiento de cálculo y requiere de gran cantidad de información sobre el tráfico, la geometría y las condiciones de la señalización. Consiste principalmente en el estudio de una intersección que ya se

encuentra en funcionamiento, y por tanto se evalúa una situación real. Éste será el tipo de análisis que se desarrolle en el presente TFM, pues como ya se ha dicho con anterioridad, se evaluará el nivel de servicio de una serie de intersecciones que ya se encuentran en funcionamiento en la ciudad de Murcia.

El **análisis de diseño** también requiere de información sobre las condiciones de tráfico, así como del nivel de servicio deseado y de las condiciones geométricas y de señalización. En este nivel de análisis, se toman valores razonables para aquellos parámetros no conocidos. En resumen, se trata de un estudio previo a la ejecución de una intersección empleado para conseguir un determinado nivel de servicio cuando finalice la realización de la obra y la intersección entre en servicio.

Por último, el **análisis de planificación** requiere únicamente la información más elemental, empleándose una serie de valores por defecto para el resto de datos de entrada. En síntesis, se puede afirmar que este tipo de análisis se emplea a la hora de realizar una primera aproximación a lo que sería la operación de una intersección en un lugar determinado.

### **3.1.1.3. Periodo de estudio y periodo de análisis**

Conocidos los tres niveles de análisis que se pueden abordar, es importante distinguir entre los conceptos de periodo de estudio y periodo de análisis. El **periodo de estudio** es el tiempo durante el cual se van a tomar medidas sobre los diversos factores implicados, como por ejemplo el tráfico.

Por otro lado, el **periodo de análisis** es el intervalo del periodo de estudio sobre el cual se aplica la metodología, por lo que un periodo de estudio puede estar formado por uno o más periodos de análisis.

Así mismo, hay que tener en cuenta que el método empleado para el estudio se basa en la suposición de que las condiciones de tráfico son estables durante todo el periodo de análisis, por lo que éste no ha de ser excesivo. Normalmente se toman valores que van desde 15 minutos hasta 1 hora, ya que periodos mayores a 1 hora pueden dar problemas debido a la falta de estabilidad de los factores de tráfico o a la posible atenuación de los efectos negativos asociados a los picos de demanda.

Es importante constatar que, si durante el periodo de análisis se produjera una demanda mayor que la capacidad de la intersección, provocando atascos, el periodo de estudio debería incluir un periodo inicial de análisis sin colas previas y un periodo final sin colas residuales, con la finalidad de conseguir una mejor estimación de los tiempos de retraso asociados a la congestión.

Por otro lado, cuando sea interesante el estudio de diferentes periodos de análisis, éstos se abordarán de manera independiente, pues la realización de un estudio conjunto y la extracción de un rendimiento medio de todos los periodos podría llevar a catalogar como adecuado el funcionamiento de una intersección cuando en realidad pudieran existir periodos intermedios en los que el rendimiento de ésta sea inaceptable.

Así, podremos tener diferentes enfoques a la hora de seleccionar el periodo de análisis en relación al periodo de estudio, siendo 3 los aportados por el HCM (ver Ilustración 7):

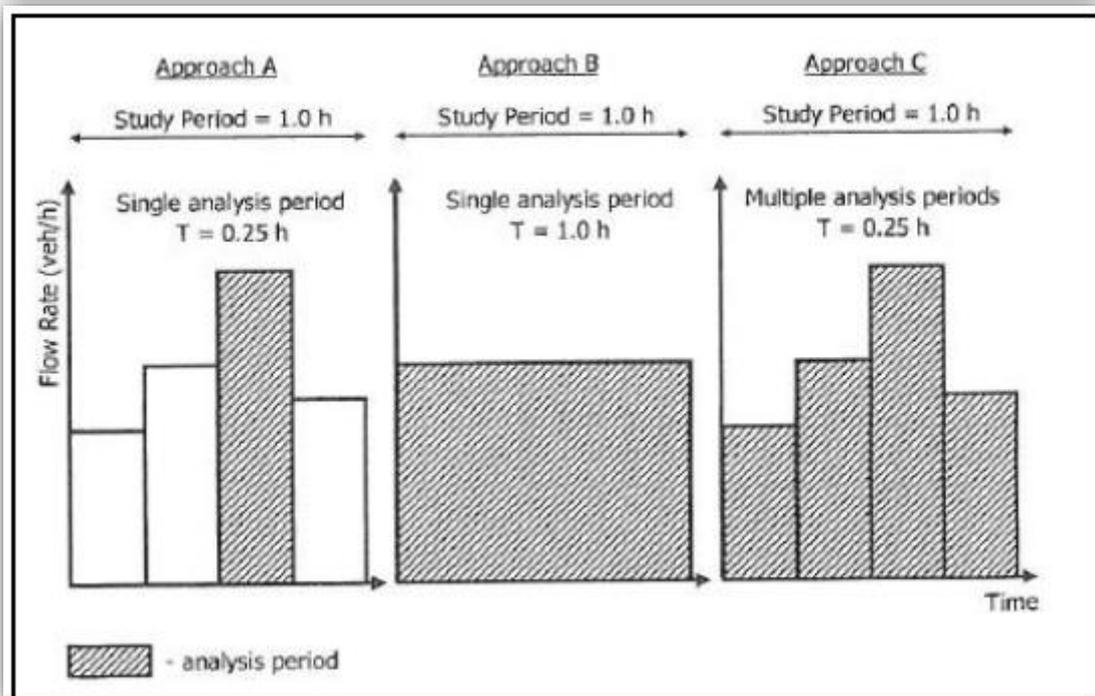


Ilustración 7. Posibles enfoques del estudio. Fuente: HCM 2010.

El **enfoque A** consiste en el análisis del periodo de 15 minutos con mayor demanda dentro del periodo total de estudio de una hora. Así, el flujo equivalente de vehículos por hora se puede extraer por dos métodos. O bien se multiplica el valor medido en los 15 minutos

de mayor demanda por 4, o se divide la demanda de una hora (en caso de que se haya medido) por un determinado “factor pico”.

El **enfoque B** se basa en la evaluación de todo el tiempo de estudio, considerando por tanto que es igual a todo el periodo de análisis. El principal problema de este caso es que se asume que la demanda de tráfico es constante durante todo el periodo, lo cual puede llevar a caer en el error de no considerar los retrasos debidos a concentraciones máximas temporales.

Por último, el **enfoque C** consiste en estudiar los datos extraídos durante todo el periodo de estudio, pero dividiéndolos en 4 periodos de análisis independientes de 15 minutos cada uno. Este método tiene la ventaja de que las posibles colas acontecidas durante un periodo de análisis determinado se transmiten a los siguientes periodos, consiguiendo de este modo una mayor precisión en la estimación de uno de los parámetros de mayor importancia en este ámbito, los retrasos.

En este trabajo se ha optado por la aplicación del enfoque A, ya que tal y como se expuso en el apartado de objetivos no se tiene únicamente la intención de calcular el nivel de servicio de las intersecciones estudiadas, sino que además se pretenderá optimizarlas. Con dicha intención, se busca que la situación analizada sea la más desfavorable de las posibles, por ello se busca que el periodo de análisis sea el que aporte la mayor demanda de tráfico.

Así pues, para el cálculo de todos los factores expresados en régimen horario se han multiplicado las características del periodo de estudio de 15 minutos por 4.

#### **3.1.1.4. Medidas del funcionamiento de la intersección**

El funcionamiento de una intersección se evalúa mediante una serie de medidas cuantitativas de algunas variables que caracterizan el servicio prestado a los diversos grupos de tráfico. Entre ellas se puede encontrar la capacidad de la intersección para operar con automóviles, el retraso sufrido por éstos, un factor asociado a las colas, el retraso o el área de circulación empleada por los peatones, o el retraso y la percepción de la intersección por parte de los ciclistas.

Además, como medida del rendimiento también se suele emplear el nivel de servicio, el cual es calculado para los tres métodos de transporte citados en el párrafo anterior. Este último criterio será el que se emplee con posterioridad en los capítulos venideros.

### **3.1.1.5. Modos de desplazamiento**

Para el HCM existen tres modos principales de desplazamiento para los cuales se desarrolla una metodología individual que mide el funcionamiento de la intersección, y son los siguientes:

- Desplazamiento con vehículos motorizados
- Desplazamiento a pie
- Desplazamiento en bicicleta

El método empleado para el análisis de los automóviles ha evolucionado con el paso de los años y actualmente refleja el resultado de muchas investigaciones. Originalmente se basó en los resultados del estudio denominado National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), el cual analizaba los procedimientos para estudiar el movimiento y las demoras de los automóviles en las intersecciones. Sin embargo, estudios realizados con posterioridad en EEUU, Australia, Gran Bretaña y Suecia lo fueron modificando hasta su forma actual.

Por otro lado, los procedimientos para la evaluación de la percepción del nivel de servicio por parte de los peatones y los ciclistas están documentados en un informe del estudio NCHRP, y los métodos para el estudio del área de circulación y los retrasos de los peatones se encuentran en dos informes de la Federal Highway Administration.

En este punto, es importante destacar que la expresión “modo de transporte mediante automóvil” se refiere al modo de transporte formado por todos los vehículos que pueden, legalmente, operar en las calles, con la excepción de los de transporte urbano que realicen paradas programadas para la bajada o subida de pasajeros en la intersección. De este modo, a menos que se especifique, la palabra vehículo se referirá al conjunto formado por coches, motocicletas, camiones y autobuses que no paren en la intersección.

### **3.1.1.6. Grupos de carriles y grupos de movimiento**

El método para automóviles está diseñado para evaluar el rendimiento de cualquiera de las siguientes posibilidades:

- Un carril de manera individual
- Un determinado grupo de carriles
- Alguna de las ramas que dan acceso a la intersección
- La intersección en su totalidad.

De este modo, se ha de informar de que cuando se escoja un determinado número de carriles o un carril individualmente para llevar a cabo un análisis, ambos casos serán designados como grupo de carriles.

En general, se denominará como grupo de carriles a cada una de las siguientes situaciones:

- Carriles o combinaciones de éstos que sirvan exclusivamente a un movimiento dentro de la intersección.
- Carriles compartidos por dos o más movimientos.

Del mismo modo se establece el concepto de grupos de movimiento, cuya principal razón de ser es la de facilitar la introducción de datos en el análisis. Así, estos grupos se suelen establecer para:

- Cada movimiento de giro con uno o más carriles destinados exclusivamente a tal fin.
- Los movimientos de paso de la intersección, incluso si comparten carril con un giro

### **3.1.1.7. Movimientos y numeración de fases**

En la ilustración 8 se muestran los movimientos contemplados por el HCM en una intersección de cuatro ramas. En ella se definen tres movimientos de tráfico de vehículos y uno de peatones, identificado por la letra P, para cada acceso a la intersección, a los cuales se asigna un número para facilitar el estudio.

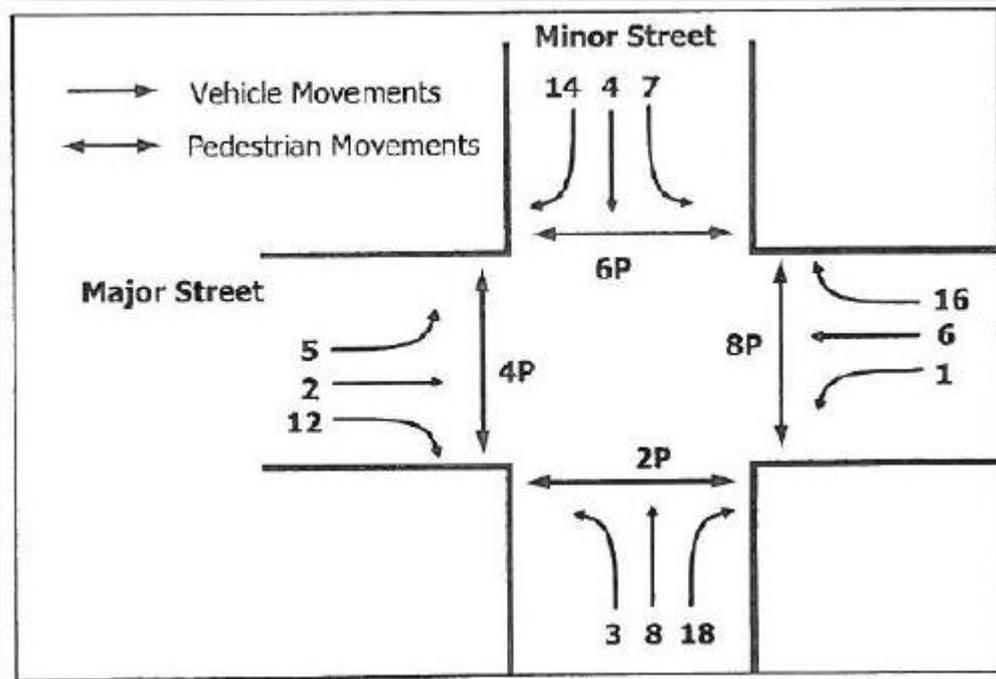


Ilustración 8. Esquema de movimientos y numeración en intersecciones. Fuente: HCM 2010

Las flechas de una sola punta de la ilustración 8 representan los movimientos que pueden realizar los vehículos desde cada una de las ramas de acceso a la intersección, mientras que las de doble punta plasman los movimientos de peatones.

Como se puede observar, en el ejemplo expuesto se numeran los movimientos siguiendo el siguiente esquema:

- Los movimientos de paso reciben los números pares del 2 al 8, numerándose en sentido de las agujas del reloj y comenzando por la rama Oeste.
- Los giros a la izquierda reciben los números impares del 1 al 7, comenzando en este caso por el giro desde la rama Este y en sentido de las agujas del reloj.
- Los giros a la derecha se numeran con los valores pares del 12 al 18, siguiendo el mismo orden empleado en la numeración de los movimientos de paso.

En relación a los movimientos de los peatones se les asigna el mismo número que el movimiento de paso contiguo con el que comparten dirección, añadiéndose la letra P para su diferenciación. Así en el ejemplo, el movimiento de peatones que cruza la calle secundaria por la rama Sur, comparte número con el movimiento de paso de la rama

Oeste, puesto que es el movimiento contiguo al paso de los peatones, es decir, el que circula junto a la acera por la que los peatones han accedido a la intersección.

Además, resulta interesante aclarar que la elección del comienzo de la numeración se hace con la finalidad de que cada fase de la señalización comparta número con el movimiento principal al que da servicio, tal y como se verá a continuación.

No obstante, para el desarrollo de los estudios realizados en el presente TFM se ha optado por identificar a los movimientos de manera alternativa, indicando el tipo de movimiento del que se trata y el acceso desde el que se origina, tal y como se verá en capítulos posteriores.

Así, si analizamos las fases de la señalización, los controladores de tráfico modernos suelen implementar una estructura de “anillo doble”, la cual permite que en cada fase haya dos movimientos complementarios con el indicador en verde. La configuración más habitual de este sistema es la que se muestra en la ilustración 9, en la cual el símbolo  $\Phi$  representa la fase en la que se encuentra el controlador.

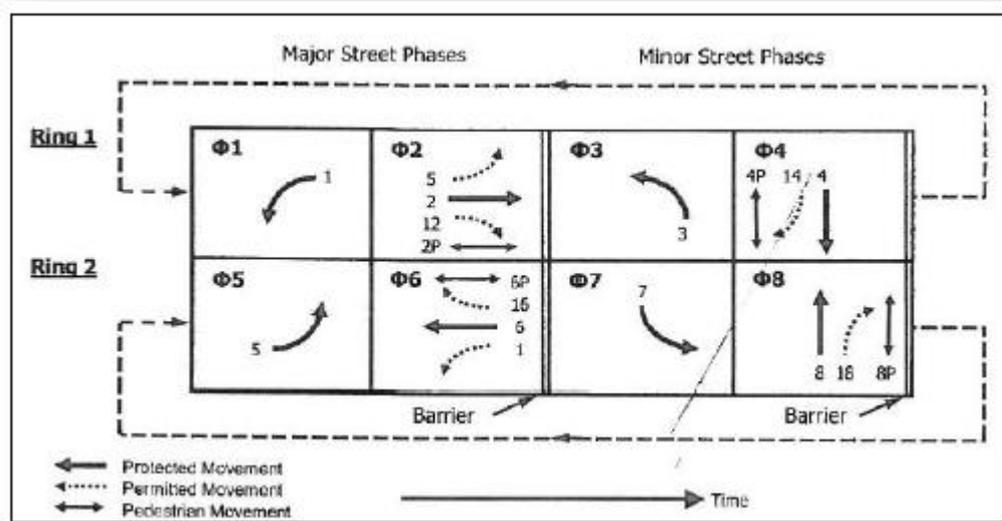


Ilustración 9. Estructura de fase de doble anillo. Fuente: HCM 2010

En la ilustración 9 puede observarse una de las múltiples posibilidades de asignación de fases de movimientos en una intersección de cuatro ramas, si bien es una de las más habituales. Como se puede ver, los movimientos se dividen en dos grandes grupos, correspondientes a la calle principal y a la secundaria, aunque dentro de estos dos grupos

se vuelve a subdividir en 4, coincidiendo el número de la fase con el del movimiento principal que se sirve en cada una de ellas, tal y como se había adelantado en los párrafos anteriores.

Se observa que cada movimiento de giro a la izquierda es asignado en una fase concebida exclusivamente a tal fin, conociéndose esta situación como movimiento protegido. Durante esta fase, la señalización correspondiente al giro a la izquierda mostrará una flecha verde. En cuanto a los movimientos de paso, de giro a la derecha y de peatones, se combinan y se asignan a otra fase exclusiva. Las líneas discontinuas del diagrama que representan los giros en las fases 2, 4, 6 y 8 indican que dichos movimientos se realizan de forma permitida, por lo que el giro será completado solo cuando no se interrumpan los movimientos protegidos, que en ese caso serían los llevados a cabo por los peatones y por los vehículos que realizaran el movimiento de paso a través de la intersección. Es decir, los movimientos permitidos han de respetar la prioridad de los movimientos que actúen en modo protegido.

### **3.1.2. Criterio de nivel de servicio**

En este apartado se describe el criterio de nivel de servicio para los diversos modos de desplazamiento estudiados, es decir, vehículos a motor, peatones y bicicletas. Es importante tener en cuenta que existe una gran diferencia entre el método para vehículos y el método para desplazamientos no motorizados, pues el criterio de nivel de servicio para automóviles está basado en medidas de campo de ciertos aspectos del funcionamiento de la intersección que además son perceptibles por los propios viajeros, mientras que para los modos de peatones y bicicletas, el criterio se basa en puntuaciones asignadas por los propios usuarios sobre la calidad del servicio prestado por la intersección.

Aunque en este apartado se describen los niveles de servicio para todos los usuarios de una intersección, en la aplicación de la normativa a las intersecciones de Murcia solo se va a calcular el nivel de servicio para automóviles, debido a que el tráfico de ciclistas observado no es significativo y a que, pese a haber registrado un volumen elevado de peatones, el flujo de éstos no es crítico para la intersección. Además, dicho flujo peatonal ya es incluido en el método de manera indirecta mediante el cálculo de ciertos factores

correctores que serán expuestos con posterioridad, los cuales son de gran influencia en el nivel de servicio final obtenido.

### **3.1.2.1. Automóviles**

El nivel de servicio puede describir a la intersección por completo, pero también puede definirse para los diferentes accesos a ésta por separado, así como para cada uno de los grupos de carriles. De este modo, empleando diversos parámetros, se pueden estudiar diferentes componentes de la intersección. Por ejemplo, si se estudian únicamente los tiempos de espera, se podrá caracterizar el nivel de servicio de toda la intersección o de una entrada a ésta. Si por el contrario se quiere caracterizar el nivel de servicio aportado por un grupo de carriles se han de analizar tanto los tiempos de retraso como la relación volumen-capacidad, ya que este último dato es característico de cada grupo y puede suponer un nivel de servicio más desfavorable el obtenido con el análisis de los retrasos.

Es importante saber que los tiempos de espera cuantificarán el incremento de tiempo de un viaje debido a las señales de tráfico, lo cual se traducirá en descontento del conductor y aumento del consumo de combustible. Por otro lado, el ratio volumen-capacidad medirá el grado en que la capacidad de una fase de la señalización es empleada por un grupo de carriles.

Así, se suelen distinguir seis niveles de servicio, representados por las letras A-F, los cuales se describen a continuación.

- El **nivel de servicio A** describe aquellas operaciones cuyo retraso no supera los 10 segundos por vehículo y cuya relación volumen-capacidad es inferior a 1. Este nivel de capacidad suele asignarse cuando la relación volumen-capacidad es baja y o bien la progresión de los vehículos debida a la señalización es excepcionalmente favorable o la duración del ciclo es muy corta. Si se asigna porque la progresión es extremadamente favorable, será porque la mayoría de vehículos llegan a la intersección durante la fase verde y pasan por ésta sin detenerse.
- El **nivel de servicio B** describe las operaciones con unos tiempos de demora de entre 10 y 20 segundos por vehículo, con una relación volumen-capacidad inferior a 1. Así, este nivel es asignado normalmente cuando el ratio volumen-capacidad es bajo y o bien la progresión es muy favorable o el ciclo es corto. Evidentemente,

el número de vehículos que se detienen en la intersección es mayor que en el nivel A.

- El **nivel de servicio C** se emplea para definir las operaciones cuyos retrasos sean de entre 20 y 35 segundos por vehículo y tengan una relación volumen-capacidad no mayor que 1. Este nivel suele asignarse cuando la progresión es favorable o la duración del ciclo es moderada. Además, es importante resaltar que en este nivel pueden comenzar a aparecer fallos en los ciclos. El número de vehículos que se detendrán será apreciable, aunque muchos podrán atravesar la intersección sin detenerse.
- El **nivel de servicio D** describe aquellas operaciones con unos tiempos de espera de entre 35 y 55 segundos por vehículo, con un ratio volumen-capacidad no mayor que 1. Este nivel suele asignarse cuando el ratio volumen-capacidad es alto y, o bien la progresión no es efectiva, o la duración del ciclo es elevada. En él, muchos vehículos deberán detenerse y se produce un número de fallos considerable.
- El **nivel de servicio E** describe operaciones con un retraso de entre 55 y 80 segundos por vehículo, cuyo ratio volumen-capacidad se sitúa por debajo de 1. Normalmente se asigna cuando la relación volumen capacidad es alta, la progresión es desfavorable y la duración del ciclo es elevada. En este nivel de servicio, los fallos son frecuentes.
- Por último, el **nivel de servicio F** se utiliza para describir aquellas operaciones en las que se producen retrasos por encima de los 80 segundos por vehículo, cuando el ratio volumen-capacidad sea superior a 1. Este nivel se asigna cuando la relación volumen-capacidad es muy elevada, la progresión muy pobre y el ciclo largo. Evidentemente, se producen muchos fallos al actuar en este nivel, llegando incluso a situaciones en las que no se eliminan las colas durante el ciclo.

En este punto es importante resaltar que el fallo puede producirse según los dos criterios comentados con anterioridad, es decir, un grupo de carriles podría tener retrasos menores de 10 segundos por vehículo, lo que supondría un nivel de servicio A, pero fallar porque su ratio volumen-capacidad sea superior a 1, por lo que la capacidad del ciclo estaría completa y representaría un fallo desde este punto de vista, tal y como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Niveles de servicio para automóviles. Fuente: HCM 2010

Retraso (s/veh)	Nivel de servicio en función del ratio Volumen - Capacidad	
	≤ 1.0	> 1.0
≤ 10	A	F
> 10 – 20	B	F
> 20 – 35	C	F
> 35 – 55	D	F
> 55 – 80	E	F
> 80	F	F

### 3.1.2.2. Peatones y bicicletas

Históricamente, el Highway Capacity Manual ha empleado medidas simples del funcionamiento de la intersección para definir el nivel de servicio. Sin embargo, con los últimos estudios desarrollados se ha llegado a la conclusión de que los usuarios consideran una amplia variedad de factores a la hora de asignar un valor a la calidad del servicio prestado. Además, no todos los factores tienen el mismo fundamento, sino que algunos pueden ser calificados como medidas del funcionamiento, como podría ser la velocidad, pero otros caracterizan la propia intersección sin llegar a medir el funcionamiento de ésta, como por ejemplo la anchura de los pasos destinados a los peatones. Así, el método para la evaluación de los modos no motorizados se basará en la combinación de todos estos factores, y su cuantificación hasta alcanzar un valor que describa la percepción que los usuarios tienen de la intersección.

Por tanto, se establecen ciertos rangos de valores que describen el nivel de servicio de la intersección, y según la puntuación otorgada por los peatones y los ciclistas, se asigna un nivel de servicio u otro. Así, al igual que en los automóviles, se definen 6 niveles de servicio, cuyas puntuaciones asociadas se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Niveles de servicio para peatones y bicicletas. Fuente: HCM 2010

Nivel de Servicio	Puntuación del Nivel de Servicio
A	≤ 2.00
B	> 2.00 – 2.75
C	> 2.75 – 3.50
D	> 3.5 – 4.25
E	> 4.25 – 5.00
F	> 5.00

### **3.1.3. Datos de entrada necesarios**

En este apartado se analizará un aspecto de gran importancia a la hora de desarrollar un estudio sobre cualquier ámbito, como son los datos de entrada que se requieren. Algunos valores por defecto de estos datos pueden encontrarse en el apartado 3 del capítulo 18 del HCM: Aplicación, el cual no será presentado en el presente TFM pero si será empleado para la aplicación del método a los casos prácticos estudiados.

#### **3.1.3.1. Automóviles**

En este epígrafe se muestran los datos necesarios para el método de estudio de los automóviles, sin embargo, antes de pasar a estudiar qué datos harán falta y desde qué punto de vista han de ser medidos, es importante aclarar algunos conceptos sobre los diversos tipos de señalización que podemos encontrar de manera habitual en las intersecciones.

En las intersecciones para las cuales está desarrollada la metodología expuesta en el HCM los semáforos que ejecutan los ciclos de señalización que rigen el funcionamiento de las intersecciones se encuentran controlados por un dispositivo denominado **controlador o regulador**, el cual puede estar instalado en el interior de un armario metálico cercano al semáforo o estar situado en una oficina central, y entre los que se pueden encontrar los siguientes tipos:

- **Autónomo**, en caso de funcionar aislado, sin enviar ni recibir señales de ningún otro regulador de la zona.
- **Sincronizable**, el cual será capaz de comunicarse mediante señales con otros controladores con el fin de realizar un trabajo conjunto.
- **Centralizado**, que estará equipado con una conexión y un protocolo de comunicaciones adecuados para recibir y enviar señales a un controlador central, que regulará a varios controladores de la zona.

Pero más importancia aún que el tipo de controlador que se disponga tiene el modo de funcionamiento de este, y al igual que con los tipos podemos encontrar tres **modos de funcionamiento** principales:

- **Accionados por el tráfico**. En este modo de funcionamiento el controlador recibe información sobre el número de vehículos que van llegando a la intersección por

medio de unos detectores. Por otro lado, el equipo regulador está dotado de un programa que analiza dicha información en tiempo real, y teniendo en cuenta las intensidades del tráfico y los vehículos que haya en las probables colas de cada una de las ramas de la intersección, establece mediante un algoritmo si se debe cambiar de fase o se debe mantener la fase actual durante más tiempo. Así, aunque la secuencia de fases de la señalización esté preestablecida, la duración de estas fases se va ajustando de manera dinámica en base al tráfico que se ha de servir.

- **Preprogramados o con tiempos fijos.** En este tipo de controladores la duración del ciclo y su reparto entre las diversas fases para cada uno de los semáforos que regulan una intersección se fija con anterioridad a su puesta en marcha. Estas duraciones fijas, una vez programadas en el regulador, se van repitiendo constantemente a lo largo de los ciclos. No obstante, en caso de que se produzcan problemas por la distribución de las fases de señalización, la duración de cada una de las fases se puede modificar para prolongar aquellas en las que no se alcance un tráfico de vehículos que evite la formación de colas o para recortar las que estén desaprovechadas por demandas escasas. Además, en intersecciones que registren grandes fluctuaciones de tráfico a lo largo del día de manera habitual, es usual tener preparadas previamente diversas secuencias de fases con diferentes duraciones, con el fin de actuar lo más rápido posible y evitar problemas asociados a las citadas fluctuaciones de la demanda.
- Con un **control centralizado o coordinado.** En este caso, el regulador de la intersección simplemente se limita a recibir órdenes de un computador central, el cual se encarga de controlar todos los semáforos de una determinada zona. Este controlador recibe información del tráfico a través de detectores y, empleando un programa, decide qué distribución de fases es más conveniente en cada momento.

Conocidos los diversos tipos de señalización que se pueden encontrar, se pueden estudiar los datos de partida necesarios para el método de los automóviles, teniendo en cuenta que en la tabla 3 se encuentran los datos necesarios para las intersecciones con control totalmente accionado o semiaccionado, mientras que en la tabla 4 se pueden ver los datos de partida adicionales que serán necesarios para intersecciones con control coordinado-accionado.

Tabla 3. Datos de entrada necesarios para controles preprogramados, totalmente accionados o semiaccionados

Tipo de datos	Dato de entrada	Ámbito del dato
Características del tráfico	Demanda	Movimiento
	Giros a la derecha durante la fase roja	Acceso
	Porcentaje de vehículos pesados	Grupo de movimiento
	Factor pico horario	Intersección
	Coefficiente de grupo	Grupo de movimiento
	Factor de ajuste de señalización anterior	Grupo de movimiento
	Cola inicial	Grupo de movimiento
	Flujo base de saturación	Grupo de movimiento
	Factor de ajuste de uso de carril	Grupo de movimiento
	Flujo de peatones	Acceso
	Flujo de bicicletas	Acceso
	Coefficiente de maniobras de aparcamiento	Grupo de movimiento
	Coefficiente de paradas de autobús	Acceso
Características geométricas	Número de carriles	Grupo de movimiento
	Ancho medio de carril	Grupo de movimiento
	Número de carriles receptores	Acceso
	Longitud de la zona de giro	Grupo de movimiento
	Presencia de aparcamiento en la calle	Grupo de movimiento
	Pendiente del acceso	Acceso
Características de la señalización	Tipo de señalización	Intersección
	Secuencia de fases	Intersección
	Modo de giro a la izquierda	Acceso
	Opción de giro a la izquierda de <i>Dallas</i>	Acceso
	Tiempo de paso (fases accionadas)	Fase
	Verde máximo (verde en fases preprogramadas)	Fase
	Verde mínimo	Fase
	Fase ámbar	Fase
	Tiempo de despeje	Fase
	Intervalo de comienzo de la marcha	Fase
	Intervalo de salida de peatones	Fase
	Resincronización de fases – <i>Phase Recall</i>	Fase
	Entrada doble (fases accionadas)	Fase
Salida simultánea (fases accionadas)	Acceso	
Otros datos	Duración del periodo de análisis	Intersección
	Límite de velocidad	Acceso
	Longitud del detector y modo de detección	Grupo de movimiento
	Tipo de área	Intersección

Tabla 4. Datos de entrada adicionales necesarios para el control coordinado-accionado

Tipo de datos	Dato de entrada	Ámbito del dato
Características de la señalización	Duración del ciclo	Intersección
	División de fases	Fase
	Offset	Intersección
	Punto de referencia Offset	Intersección
	Modo forzado	Intersección

La tercera columna de las tablas da información acerca de si los datos son necesarios para cada tipo de movimiento, para un movimiento específico, para cada fase de la señalización, para cada rama de aproximación a la intersección o para la intersección por completo.

### **3.1.3.1.1. Datos de las características del tráfico**

En este apartado se describen los datos que hacen referencia a las características del tráfico mostrados en las tablas 3 y 4, los cuales describen el flujo de vehículos motorizados que viajan a través de la intersección durante el periodo de estudio.

#### **Demanda**

La demanda para los movimientos de tráfico en una intersección se define como el número de vehículos que llegan a la intersección durante el periodo de análisis, dividido por la duración de dicho periodo. Se suele expresar como un flujo por hora, aunque puede representar periodos de una duración menor, por ello en ocasiones se hace referencia a ella como “Tasa de demanda” o “Ratio de demanda”, pues como ya se ha indicado muestra un valor en función de un periodo de tiempo determinado.

Cuando las medidas se tomen in situ, el flujo estará asociado al tráfico registrado antes de llegar a la intersección, para evitar la influencia de las posibles colas. Este aspecto es importante sobre todo cuando las medidas se lleven a cabo durante periodos de mucho tráfico, pues contar los vehículos que se encuentren en una cola o en una congestión hará que el valor obtenido sea inferior al real.

Existe una excepción para la anterior definición de la demanda, empleada cuando se quiere conocer el valor de dicho parámetro para el periodo pico de 15 minutos. Éste se obtendrá dividiendo la demanda horaria de cada movimiento de la intersección entre el factor de periodo pico, el cual tendrá un valor basado en las tendencias del tráfico o podrá ser supuesto por defecto si no es posible su medida.

El método incluye además un procedimiento para determinar la distribución del tráfico entre los carriles disponibles en los accesos a las intersecciones que tengan uno o más carriles compartidos, pues si solo dispusiera de carriles exclusivos la distribución del tráfico entre éstos vendría determinada simplemente por la colocación de los vehículos en el carril que diera el servicio al movimiento que quisieran realizar. Este procedimiento

se emplea en los análisis de planificación, por lo que no será utilizado en el presente TFM, y consiste en asumir que la voluntad de los conductores es la de elegir el carril que minimice el tiempo de estancia u operación en la intersección, empleándose el ratio volumen-saturación del carril para estimar las diferencias de tiempo entre los carriles existentes. Este supuesto no es siempre válido, pues en sucesiones de intersecciones cercanas los conductores pueden situarse en un carril en una determinada intersección para prepararse para realizar un movimiento en la intersección posterior, situación que el analista ha de tener en cuenta.

Por último, se debe señalar que solo los giros a la derecha que estén controlados por la señalización deben ser incluidos en el volumen de demanda de movimientos de giro a la derecha, ya que, si el giro está permitido en la fase roja de la señalización, el analista debe reducir la tasa de giros a la derecha total empleando la tasa de vehículos que giren a la derecha en rojo (Right-turn-on-red RTOR).

### **Giros a la derecha durante la fase roja**

La tasa de giros a la derecha en rojo es definida como el número de vehículos que giran a la derecha en la intersección mientras que la señal controladora está en su fase roja, dividido por la duración del periodo de análisis. Al igual que la demanda anterior, se expresa como un flujo horario, pero puede representar periodos de análisis inferiores a una hora.

Es difícil predecir este valor, ya que está basado en muchos factores que varían ampliamente de unas intersecciones a otras. Entre ellos podemos encontrar los siguientes:

- Distribución de carriles del acceso a la intersección, pues puede tratarse de carriles exclusivos de giro a la derecha o de varios carriles compartidos.
- Demanda de giros a la derecha.
- Distancia de visibilidad para los conductores que quieran girar a la derecha.
- Ratio volumen-capacidad de los movimientos conflictivos con el giro que se esté analizando.
- Patrón de llegada de vehículos que pretendan girar a la derecha durante el ciclo.
- Patrón de salida de los vehículos que desarrollen movimientos conflictivos con el giro a la derecha.

- Fases de la señalización para el giro a la izquierda en la calle conflictiva con el giro a la derecha.
- Conflictos con los peatones.

Dada la dificultad de estimar este valor, suele ser habitual medirlo in situ cuando es posible. Sin embargo, cuando se estén analizando condiciones futuras o cuando el valor no se conozca de las medidas de campo, puede considerarse como cero de forma conservadora.

### **Porcentaje de vehículos pesados**

Un vehículo pesado se define como aquel que tiene simultáneamente más de cuatro neumáticos tocando el pavimento. Los vehículos de transporte público que se detienen dentro de la intersección no están incluidos en el recuento de estos vehículos.

El porcentaje de vehículos pesados representa el número de éstos que llegan a la intersección durante el periodo de análisis dividido por el número total de vehículos. Este valor puede ser calculado para cada movimiento en particular, sin embargo para los estudios de planificación se puede emplear un valor representativo para todos los movimientos desarrollados en la intersección.

### **Factor pico horario**

El factor de pico horario de la intersección se calcula mediante la siguiente expresión:

$$PHF = \frac{n_{60}}{4 \cdot n_{15}}$$

Donde:

- PHF: Factor Pico Horario
- $n_{60}$ : Vehículos contados durante una hora (veh)
- $n_{15}$ : Vehículos registrados durante el periodo de 15 minutos con mayor tráfico (veh)

El valor de  $n_{15}$  del denominador debe ser medido dentro del periodo horario en el que se registra el valor de  $n_{60}$ . Ambos valores representan a la totalidad de vehículos que transitan por la intersección, por lo que solo se obtiene un valor pico para cada cruce,

aunque éste se puede aplicar individualmente a todos los movimientos. Los valores típicos de este factor están entre 0.8 y 0.95.

El uso de un único factor de pico para toda la intersección tiene la finalidad de evitar la posibilidad de crear escenarios de demanda con volúmenes desproporcionados.

### **Coefficiente de grupo**

El coeficiente de grupo se emplea para describir la calidad de la progresión de la señalización para el correspondiente grupo de movimiento. Se calcula mediante la división de la tasa de demanda durante la fase verde y la demanda media. Los valores típicos para este coeficiente se sitúan entre 0.33 y 2.

En la tabla 5 se muestran una serie de valores cualitativos de la progresión en función de los valores cuantitativos del coeficiente de grupo.

*Tabla 5. Calidad de la progresión en función del coeficiente de grupo. Fuente: HCM 2010*

Coeficiente de grupo	Tipo de llegada	Calidad de la progresión
0.33	1	Muy pobre
0.67	2	Desfavorable
1.00	3	Llegadas aleatorias
1.33	4	Favorable
1.67	5	Muy favorable
2.00	6	Excepcionalmente favorable

El coeficiente de grupo puede ser estimado en análisis operacionales mediante datos de campo empleando la siguiente ecuación:

$$R_p = \frac{P}{g/C}$$

Donde:

- $R_p$ : coeficiente de grupo (platoon ratio)
- P: Proporción de vehículos que llegan durante la fase verde
- g: Verde efectivo (s)
- C: Duración del ciclo (s)

El valor de P se obtiene dividiendo el número de vehículos que llegan a la intersección durante la fase verde de la señalización entre el número de vehículos total que llegan durante todo el ciclo.

Si la intersección objeto de estudio forma parte de un sistema de señalización, el procedimiento para el cálculo del flujo de llegada a la intersección se basará en emplear el perfil de llegadas para calcular la proporción de éstas que se producen durante la fase verde.

Por otro lado, si la intersección que se está analizando no forma parte de un sistema de señalización, pero es una intersección existente, es recomendable emplear medidas de campo para las diversas variables de la ecuación anterior y así estimar el coeficiente de grupo.

Por último, si la intersección que se esté estudiando ni es parte de un sistema de señalización ni es una intersección existente, sino que se está proyectando, o si los valores de las variables de la ecuación no pueden ser extraídos de medidas de campo, el coeficiente de grupo puede extraerse de la tabla 5 mediante la asignación de un tipo de llegada (1 a 6). Estos tipos de llegada se caracterizan por:

- La llegada **tipo 1** se caracteriza por grupos densos en los que más del 80% del volumen llega a la intersección al comienzo de la fase roja. Este tipo de llegada suele asociarse a tramos cortos con muy mala progresión en el sentido de movimiento que se esté estudiando, y probablemente, buena progresión en la otra dirección.
- La llegada **tipo 2** se caracteriza por grupos moderadamente densos llegando a mitad del intervalo rojo de la señalización, o por grupos dispersos en los que del 40 al 80% del volumen de tráfico llega a lo largo de la fase roja. Normalmente, este tipo de llegada se asocia a tramos de longitud media con progresión de señalización desfavorable en la dirección de estudio.
- La llegada **tipo 3** puede definirse mediante dos condiciones. Si las señales que delimitan el tramo están coordinadas, este tipo de llegada se caracteriza por un grupo que contiene menos del 40% del volumen de tráfico llegando una parte durante el intervalo rojo y la otra durante el verde. Si por el contrario las señales no están coordinadas, este tipo de llegada se caracteriza por grupos llegando a la

intersección en diferentes momentos del periodo de análisis, de modo que se puede considerar que las llegadas son aleatorias.

- La llegada **tipo 4** se caracteriza por grupos moderadamente densos que llegan en medio del intervalo verde o grupos dispersos que contienen entre el 40 y el 80% del volumen del grupo llegando a lo largo de la fase verde. Este tipo de llegada suele asociarse a tramos de longitud media con una progresión de señalización favorable en la dirección que se está estudiando.
- La llegada **tipo 5** se caracteriza por grupos densos de más del 80% del volumen que llegan a la intersección al comienzo de la fase verde. Este tipo de llegada suele asociarse a tramos cortos con una progresión de señalización muy favorable en la dirección de estudio y un número de entradas de la otra calle de bajo a moderado.
- La llegada **tipo 6** se caracteriza por grupos densos de más del 80% del volumen llegando al comienzo de la fase verde. Este tipo de llegada ocurre solo en tramos muy cortos con una progresión de señalización excepcionalmente favorable en la dirección de estudio y con entradas laterales despreciables. Esta señalización está reservada para rutas en redes de señalización densas, con calles de un único sentido de circulación.

### **Factor de ajuste de señalización anterior**

Este factor, normalmente representado por la letra *I*, tiene en cuenta el efecto de una señal colocada con anterioridad a la intersección que se está estudiando sobre la llegada de vehículos a la propia intersección. Concretamente, refleja la forma en la que una señal aguas arriba de la intersección varía el número de llegadas por ciclo.

Dicha variación es decreciente con el incremento del ratio volumen-capacidad, pudiendo reducir la frecuencia de fallos del ciclo de señalización y por tanto los retrasos.

Su valor suele variar entre 0.09 y 1, representando el valor de 1 a una intersección aislada, es decir, sin estar influenciada por señalizaciones anteriores. Un valor menor que 1 será apropiado para intersecciones no aisladas, calculándose dicho valor mediante la siguiente expresión:

$$I = 1,0 - 0,91 \cdot X_u^{2,68} \geq 0,09$$

Donde:

- I: Factor de influencia de señalización anterior
- $X_u$ : Coeficiente de ponderación de los movimientos producidos aguas arriba que contribuyen al volumen de movimientos que se esté estudiando ( $\leq 1$ )

La variable  $X_u$  se calcula como el coeficiente de ponderación de todos los movimientos producidos aguas arriba de la intersección que contribuyen al volumen del grupo de movimiento que se esté estudiando. Para estudios de planificación y diseño, puede aproximarse con el valor del ratio volumen-capacidad del movimiento de paso de la intersección anterior.

### **Cola inicial**

Este parámetro representa las colas existentes al inicio del periodo de análisis que afecten al movimiento que se esté estudiando. Pueden ser estimadas mediante una monitorización continua de los coches que se encuentran en cola durante los tres ciclos de señalización previos al periodo de análisis, siendo la cola inicial asumida la media de las citadas tres medidas. Además, es importante que no se incluyan en este parámetro los vehículos que se encuentren en cola debido a las fluctuaciones aleatorias producidas entre ciclo y ciclo.

### **Flujo base de saturación**

El flujo de saturación representa el flujo máximo de vehículos para un carril, medido sobre la línea de stop durante la fase verde de la señalización. El flujo base de saturación representa el flujo de saturación producido en un carril de 3,65 metros de ancho y sobre el cual no circulan vehículos pesados, sin pendiente, sin aparcamientos, sin autobuses que paren en la intersección, aunque utilicen el carril y sin vehículos que vayan a girar. Normalmente, se selecciona un flujo base para representar todas las intersecciones señalizadas en la zona en la que se encuentra la intersección objeto de estudio.

El valor de este flujo base de saturación se mide en coches por hora y carril.

### **Factor de ajuste de uso de carril**

Este factor cuantifica la distribución desigual de tráfico entre los carriles para aquellos movimientos que se puedan desarrollar por más de un carril, por tanto, no se emplea a menos que un movimiento disponga de más de un carril exclusivo para ser llevado a cabo. Se suele emplear para ajustar el flujo base de saturación y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$f_{LU} = \frac{v_g}{N_e \cdot v_{g1}}$$

Donde:

- $f_{LU}$ : Factor de ajuste de uso de carril
- $v_g$ : Demanda por grupo de movimiento (veh/h)
- $v_{g1}$ : Demanda en carril exclusivo con mayor tráfico para el grupo de mov. (veh/h)
- $N_e$ : Número de carriles exclusivos para el movimiento (carriles)

Cuando pueda asumirse que el tráfico está uniformemente distribuido a lo largo de los carriles exclusivos se podrá tomar un valor para  $f_{LU}$  de 1, aplicándose valores inferiores cuando no se esté en la citada situación. Así, cuando la demanda sea cercana a la capacidad, el valor de  $f_{LU}$  será cercano a 1, pues los conductores tendrán menos capacidad de decisión y tenderán a distribuirse de manera más uniforme.

Por otro lado, en algunas intersecciones los conductores escogerán situarse en unos carriles de paso para “preposicionarse” para realizar un giro en una intersección posterior. En estos casos, para obtener unas medidas más precisas será conveniente tomarlas in situ, e incluirlas como datos de partida de la metodología.

### **Flujo de peatones**

El flujo de peatones se basa en la cuenta de cuantos usuarios cruzan los pasos de peatones que son atravesados por vehículos que giran a la derecha desde la aproximación a la intersección que se esté estudiando durante el periodo de análisis. Por ejemplo, el flujo de peatones de la rama del oeste describirá el flujo en el paso de peatones de la rama norte. Además, es importante tener en cuenta que se registra por separado cada dirección dentro del paso de peatones, y se divide el valor medido por el periodo de análisis. Posteriormente se suman para obtener el valor del flujo de peatones.

### **Flujo de bicicletas**

El flujo de bicicletas se basa en el conteo de las bicicletas que siguen una trayectoria que es cruzada por los vehículos que giran a la derecha desde el acceso a la intersección que se esté estudiando durante el periodo de análisis. Estas bicicletas pueden circular por un carril bici o por el arcén. Por tanto, no se deben tener en cuenta las bicicletas que circulen por el carril derecho junto a los automóviles, pues la interacción no está integrada en la

metodología de cálculo. Por último, se divide el valor registrado por la duración del periodo de análisis para obtener un flujo horario.

### **Coeficiente de paradas de autobús**

Este coeficiente representa el número de autobuses que paran para cargar o descargar pasajeros y bloquean el tráfico de un determinado movimiento dentro de una distancia de 76 metros medidos desde la línea de parada de la intersección, ya sea hacia atrás o hacia adelante. Una vez medido el número de autobuses, se divide el valor obtenido por la duración del periodo de análisis para obtener un flujo horario. Al igual que en el caso anterior, si el número de autobuses es muy elevado, se admite un valor máximo de 250 autobuses por hora.

#### **3.1.3.1.2. Datos geométricos**

En este apartado se describen los parámetros geométricos empleados como datos de partida a la hora de llevar a cabo un análisis de una intersección. Éstos harán referencia a aquellos elementos geométricos de la intersección que puedan influir en el tráfico.

### **Número de carriles**

Este parámetro describe el número de carriles disponible para cada movimiento. Para los movimientos de giro, solo se tendrán en cuenta los carriles destinados exclusivamente a los vehículos que vayan a realizar dicho giro. Los carriles que sean compartidos por dos o más movimientos serán asignados a la cuenta de carriles para el movimiento de paso y se denominarán carriles compartidos. Por tanto, si en la intersección que se esté estudiando no hay ningún carril destinado únicamente a un giro, el número de carriles para ese movimiento será 0, aunque pueda haber algún carril compartido que permita girar.

### **Ancho medio de carril**

Este parámetro representa el ancho medio de los carriles para un determinado movimiento. Como mínimo tendrá un valor de 2.45 metros, siendo el ancho de carril estándar de 3.65 metros. Es importante tener en cuenta que aquellos carriles que tengan un ancho superior a 4.85 metros podrán incluirse en el cálculo, sin embargo, el analista deberá considerar si dicho carril actúa en realidad como dos carriles estrechos debido a sus dimensiones.

### **Número de carriles receptores**

El número de carriles receptores representa a los carriles que parten de la intersección. Este parámetro debe ser determinado por separado para cada giro a la izquierda y a la derecha. La experiencia indica que en ciertas intersecciones es difícil ejecutar el giro de manera apropiada debido a la presencia de coches aparcados en doble fila, por lo que siempre que sea posible, es conveniente determinar el número de carriles receptores mediante medidas in situ.

### **Longitud de la zona de giro**

Este parámetro indica la longitud de la zona de la calzada destinada a realizar el giro en la cual los carriles tienen su ancho completo y los vehículos en cola pueden quedar retenidos, es decir, una vez superado el tramo triangular en el que el carril destinado al movimiento de giro va ganando anchura progresivamente. Su medida se realiza en paralelo al eje de la carretera. En caso de que haya diferentes carriles en el área de giro y sus longitudes sean distintas, la longitud final será el valor medio de los existentes.

### **Presencia de aparcamiento en la calle**

Este dato indica si está permitido aparcar durante el periodo de análisis junto al bordillo adyacente a un determinado movimiento y desde una distancia de 76 metros antes de la línea de stop de la intersección.

En calles de doble sentido, la presencia de aparcamiento se mide únicamente en el lado derecho mientras que en calles de sentido único es medida por separado para ambos lados.

### **Pendiente del acceso**

Este dato define la pendiente media a lo largo de todo el tramo de aproximación a la intersección, medida desde la línea de stop hasta un punto situado 30 metros antes de llegar a ésta. Se mide en paralelo a la dirección del tráfico. Si la carretera tiende a subir, tendrá una pendiente positiva y si por el contrario tiende a bajar, tendrá una pendiente negativa.

#### **3.1.3.1.3. Datos de la señalización**

En este apartado se describen los diversos datos relacionados con la señalización.

## **Tipo de señalización**

La metodología de análisis está basada en la operación con controladores totalmente accionados por el tráfico. Sin embargo, mediante la especificación de los datos de entrada apropiados se puede aplicar a sistemas semiaccionados, coordinados-accionados y preprogramados.

Para sistemas semiaccionados, basta con aplicar los siguientes ajustes para las fases que no sean accionadas por el tráfico:

- Establecer el máximo periodo verde con un valor apropiado.
- Suponer que se produce la máxima resincronización de la fase.

Por otro lado, para sistemas con control preprogramado se aplican los siguientes ajustes para cada fase de la señalización:

- El máximo periodo verde es establecido en función de la duración deseada.
- Suponer que se produce la máxima resincronización de la fase.

Los ajustes empleados para el control coordinado-accionado son descritos en otro capítulo de la normativa que se está estudiando, por lo que no son objeto del presente TFM.

## **Secuencia de fases**

A grosso modo, la secuencia de fases describe el orden con el que se presta servicio a cada uno de los movimientos desarrollados en la intersección.

## **Modo de giro a la izquierda**

Este parámetro describe como es servido por el controlador el movimiento de giro a la izquierda. Este modo de actuación puede ser permitido, protegido o protegido-permitido.

## **Opción de giro a la izquierda de Dallas**

Esta opción autoriza al giro a la izquierda a desarrollarse en el modo protegido-permitido sin causar el problema de seguridad conocido como “yellow trap”. Para ello, une eficazmente el periodo de giro a la izquierda permitido con el movimiento opuesto de paso.

Para emplear este tipo de control, se suele colocar una flecha amarilla intermitente hacia la izquierda en la señalización, de modo que los vehículos que realizan dicho movimiento saben que deben respetar la prioridad de los vehículos que realicen el movimiento de paso en el sentido opuesto.

### **Tiempo de paso (fases accionadas)**

El tiempo de paso es el máximo intervalo de tiempo que puede transcurrir entre dos vehículos que provoca que la indicación verde se mantenga constante. Es un valor de entrada para cada fase actuada de señalización en intersecciones con controladores accionados por el tráfico.

Los valores típicos de tiempo de paso se basan en la longitud de la zona de detección, la localización de dicha zona en relación a la línea de parada, el número de carriles servidos por cada fase de señalización y la velocidad de los vehículos. Los tiempos de paso elevados son usados normalmente con zonas de detección cortas, grandes distancias entre la zona de detección y la línea de stop, pocos carriles o velocidades bajas.

El objetivo de determinar este parámetro es que sea suficiente como para asegurar que todas las colas de vehículos sean servidas, pero sin llegar a extender el tiempo verde por la llegada aleatoria del tráfico. En los accesos a intersecciones en los que se circule a altas velocidades, el objetivo debe ser además que no se llegue frecuentemente al valor del verde máximo ajustado, pero sin comprometer la seguridad de la finalización de la fase.

### **Verde máximo (Verde en fases preprogramadas)**

Este parámetro define el máximo tiempo que la señalización puede mostrar el color verde en presencia de demandas conflictivas. Los valores típicos para el giro a la izquierda se sitúan entre 15 y 30 segundos, mientras que para los movimientos de paso serán de entre 30 y 60 segundos para la calle principal y de 20 a 40 segundos para la secundaria.

### **Verde mínimo**

Este valor representa el menor tiempo que la señal deba indicar el color verde durante la fase correspondiente. Este tiempo está basado en la consideración del tiempo de reacción de los conductores, el tamaño de las colas y las expectativas de los conductores. Los valores habituales suelen situarse entre 4 y 15 segundos, siendo los valores menores de este rango los empleados en señalizaciones de giros y movimientos de paso con un

volumen pequeño. Además, en intersecciones sin botón para solicitar el paso de los peatones, este valor debe ser suficiente para permitir tiempo a los peatones de reaccionar ante la señalización y cruzar la calle.

### **Fase ámbar y tiempo de despeje**

El intervalo de fase ámbar se incluye con la intención de avisar al conductor de que se va a pasar a señalización roja. Su duración suele estar entre 3 y 6 segundos, siendo los valores más elevados del rango los empleados en vías de alta velocidad.

Por su parte, el tiempo de despeje puede ser empleado para permitir un breve periodo de tiempo después de la señal ámbar, durante el cual la señal asociada con la fase que termina y todas las señales de las fases conflictivas muestran el color rojo. Si se usa, su duración suele ser de 1 a 2 segundos.

Los ajustes relacionados con estos parámetros se han de introducir para cada fase de la señalización.

### **Intervalo de comienzo de la marcha. Señal de “Caminar”**

El intervalo comienzo de la marcha tiene como finalidad dar a los peatones, como mínimo, el tiempo necesario para recibir la señal y comenzar a cruzar antes de que comience el intervalo de salida de peatones.

Así, para fases accionadas o no coordinadas este intervalo es normalmente establecido como el mínimo necesario para que los peatones perciban la señal y abandonen la acera, puesto que mediante su actuación pueden extenderlo. De este modo, algunos estudios consideran que debe ser de 7 segundos, sin embargo, suelen emplearse valores inferiores como 4 segundos. No obstante, pueden considerarse mayores duraciones en zonas cercanas a colegios o frecuentadas por personas de avanzada edad.

Para fases preprogramadas, la duración de este intervalo varía pues se ha de tener en cuenta que no solo debe dar tiempo a entrar en la intersección y comenzar a cruzar, sino que se debe dejar un tiempo para que peatones que no se encontraban en la acera y alcancen la intersección entren a ella antes de que comience el intervalo de salida de peatones. Por tanto, suele ser un valor obtenido de restar al intervalo verde mínimo necesario para los coches el valor del intervalo de salida de peatones.

### **Intervalo de salida de peatones**

El intervalo de salida de peatones está muy relacionado con el parámetro anterior, y tiene como finalidad proporcionar el tiempo necesario a los peatones que se encuentren cruzando la intersección para llegar a la acera opuesta o a la mediana en calles en las que se disponga de ellas. Algunos organismos consideran este valor igual al tiempo necesario para cruzar, siendo este valor el resultante de dividir la distancia entre las aceras que se quieren cruzar por la velocidad a la que caminan los peatones, normalmente 1 m/s. Esta consideración se hace porque, pese a que no es recomendable, muchos peatones comienzan a cruzar cuando el intervalo de comienzo de la marcha ya ha finalizado, y de este modo se les da el tiempo necesario para que puedan resguardarse o terminar su movimiento sin peligro.

### **Resincronización de fases. Phase Recall**

Este factor solo se aplica si el sistema de señalización de la intersección dispone de resincronización de fases, es decir, las fases se autorregulan automáticamente en función del tráfico en cada instante de tiempo. Actualmente, esta metodología no se aplica en intersecciones españolas, no se aborda en detalle en el presente Trabajo Fin de Máster.

Nótese que el Manual de Capacidad Americano (HCM) añade cuatro aspectos más en relación a las operaciones automáticas (autorreguladas por sensores), la “entrada doble”, la “salida simultánea”, el punto de referencia “offset” y el “modo forzado” los cuáles no se han desarrollado en detalle al no encontrar este tipo de intersecciones en España, y cuyo estudio necesita un análisis exhaustivo para entender su correcto funcionamiento, quedando fuera del objetivo de este trabajo.

#### **3.1.3.1.4. Otros datos**

En este subapartado se describen los conceptos clasificados como otros datos

#### **Duración del periodo de análisis**

El periodo de análisis es el intervalo considerado para llevar a cabo las medidas del funcionamiento de la intersección. Suele situarse entre 15 minutos y 1 hora, empleándose los tiempos superiores de este intervalo para los estudios de planificación. En general, cuando se empleen intervalos de 1 hora o más, el analista ha de tener precaución al estudiar los datos, pues los efectos negativos de picos de demanda de corta duración

pueden pasar inadvertidos. Del mismo modo, se tendrá especial cuidado con los intervalos inferiores a los 15 minutos, ya que estos picos podrían no registrarse.

El método que emplea la normativa fue desarrollado para evaluar condiciones en las que las colas no afectan al funcionamiento de la intersección que se esté estudiando, ni a ninguna intersección anterior durante el periodo de análisis. Por tanto, si las colas afectan al funcionamiento de la intersección, el analista deberá considerar el uso de herramientas de análisis alternativas que sean capaces de incluir estos efectos en el estudio.

La duración del periodo de análisis se puede afrontar desde diferentes enfoques en función del tipo de estudio que se quiera llevar a cabo:

Análisis operacional. Para llevar a cabo estudios de naturaleza operacional, sería conveniente emplear periodos de análisis de 15 minutos, teniendo en cuenta que en esta duración se deberían capturar con precisión los efectos adversos de los picos de demanda. Cualquier periodo de 15 minutos puede ser evaluado con el método, sin embargo, una evaluación completa debería incluir siempre un análisis de las condiciones durante el periodo de 15 minutos que experimentara la mayor demanda de tráfico de todo un día.

Si la demanda de tráfico excediera la capacidad para los 15 minutos dados, se realizaría un análisis multiperiodo. Este tipo de análisis consiste en una evaluación de varios periodos consecutivos de 15 minutos. Los periodos analizados incluirán un periodo inicial sin colas, uno o más periodos en los que la demanda exceda la capacidad y un periodo final en el que no queden colas residuales.

Cuando este tipo de análisis sea empleado, las medidas del funcionamiento de la intersección se anotarán para cada periodo, evitando realizar una media de todos los periodos registrados.

Análisis de planificación. Para la mayoría de los análisis de planificación se suelen emplear periodos de 15 minutos, sin embargo, las demandas horarias de tráfico son normalmente generadas por los procesos de planificación. Así, cuando las previsiones de las demandas para periodos de 15 minutos no estén disponibles, el factor horario de pico debe ser empleado para estimar la demanda de los 15 minutos del periodo de análisis. Un periodo de una hora puede emplearse cuando sea conveniente. Independientemente de la duración del periodo de análisis, un análisis de periodo único es empleado muy habitualmente para aplicaciones de planificación.

### **Límite de velocidad**

En el método se emplea la velocidad media para evaluar el funcionamiento de los grupos de carriles. Ésta se relaciona con el límite de velocidad cuando el límite refleja los factores geométricos y del entorno que influyen sobre el conductor a la hora de escoger la velocidad de circulación. Por tanto, el límite de velocidad representa una variable de entrada que puede ser empleada para estimar la velocidad de circulación, limitando a la vez la necesidad de muchos datos del entorno y geométricos. No obstante, la posibilidad de emplear el límite de velocidad como una variable de entrada ha de ser tomada con precaución.

El método se basa en asumir que el límite de velocidad mostrado es consistente con el que se encuentra en las calles cercanas a la intersección objeto de estudio y con la política específica respecto a los límites de velocidad. En caso de que el límite de velocidad no satisfaga estos supuestos, el valor que se introduce en el método debe ser ajustado para que si cumpla ambos requisitos.

### **Longitud del detector de línea de parada y modo de detección**

Para aquellas intersecciones que actúan bajo la acción de controladores de tráfico, la longitud de detección de la línea de parada representa la longitud de la zona de detección usada para extender la duración de la señal verde. Esta zona se localiza normalmente cerca de la línea de parada y debe tener una longitud de 12 metros o más. Sin embargo, en algunos casos puede estar localizada poco antes de la línea de stop y reducir en gran medida su longitud, llegando a medir hasta 1.8 metros.

El modo de detección influye sobre la duración de la operación de detección que se realiza. Pueden emplearse dos métodos: presencial o mediante pulsador. El modo presencial es el empleado normalmente por defecto, pues aporta resultados más exactos que la operación mediante pulsador.

En el modo presencial, la actuación comienza cuando el vehículo llega a la zona de detección y finaliza cuando el vehículo abandona dicha zona. Así, el tiempo de duración de la actuación depende de la longitud del vehículo, de la longitud de la zona de detección y de la velocidad del vehículo. Se suele emplear con zonas de detección largas localizadas en la línea de parada.

Por su parte, en el método por pulsador la actuación comienza y acaba cuando el vehículo llega al detector (realmente dura 0.1 o 0.15 segundos).

### **Tipo de área**

La información sobre el tipo de área se emplea para indicar las características del entorno de la intersección que puedan influir sobre el funcionamiento de ésta, pues no es lo mismo que la intersección se encuentre cercana a un “distrito central de negocios” (CBD) o a una zona rural. Así, se considerará que una intersección está en un CBD o en un área similar cuando se pueda encontrar en ella calles estrechas, maniobras de aparcamiento frecuentes, vehículos que obstruyan el paso, actividad de taxis y autobuses, radios de giro pequeños, exclusividad de carriles para giros, alta actividad de peatones, población densa, etc. La saturación media en intersecciones de áreas con estas características es significativamente mayor que la que se encuentra en intersecciones de áreas menos congestionadas, por lo que el flujo base de saturación se verá afectado por un coeficiente reductor.

#### **3.1.3.2. Modos no motorizados**

En este punto se describen los datos iniciales necesarios para el empleo de los métodos de peatones y bicicletas. Estos datos se muestran en la tabla 6, en la cual se clasifica cada elemento de entrada según el modo de viaje, mostrando además en qué contexto es necesario cada uno de estos datos, ya sea para una fase de la señalización, para una rama de la intersección o para un tramo de aproximación a esta, para un movimiento o para el conjunto de la intersección en general. Así, cuando un dato no aparece referido a ninguno de los conceptos anteriores, es porque no es necesario para el modo de viaje al que haga referencia.

Además, los datos mostrados en la tabla no incluyen ningún tipo de factor de calibración, pues a éstos se les suelen dar una serie de valores por defecto ya que suelen tener unos rangos de variación pequeños y no tienen un impacto importante sobre el resultado final del estudio.

Tabla 6. Datos de entrada necesarios para el método de peatones y bicicletas

Tipo de datos	Dato de entrada	Peatones	Bicicletas
Características del tráfico	Demanda de vehículos a motor	Grupo de movimiento	Acceso
	Giros a la derecha durante la fase roja	Acceso	
	Giros a la izquierda permitidos	Grupo de movimiento	
	Velocidad media del percentil 85	Acceso	
	Flujo de peatones	Grupo de movimiento	
	Flujo de bicicletas		Acceso
	Proporción de aparcamiento ocupado		Acceso
Características geométricas	Ancho de la calle		Acceso
	Número de carriles	Rama	Acceso
	Número de isletas de giro a la derecha	Rama	
	Ancho del carril de salida del movimiento de paso		Acceso
	Ancho del carril bici		Acceso
	Ancho del bordillo		Acceso
	Ancho total de la zona peatonal	Acceso	
	Ancho del paso de peatones	Rama	
	Longitud del paso de peatones	Rama	
	Radio de la esquina	Acceso	
Características de la señalización	Intervalo de comienzo de la marcha	Fase	
	Intervalo de salida de peatones	Fase	
	Prolongación de "Caminar"	Fase	
	Duración del ciclo	Intersección	Intersección
	Fase ámbar	Fase	Fase
	Tiempo de despeje	Fase	Fase
	Duración de la fase que sirve a peatones y bicicletas	Fase	Fase
	Presencia de semáforos para peatones	Fase	
Otros datos	Duración del periodo de análisis	Intersección	Intersección

Así, una vez que han sido presentados todos los datos de entrada necesarios para los métodos de modos de viaje no motorizados, se pasa a realizar una breve descripción de cada uno de ellos.

### 3.1.3.2.1. Datos de características del tráfico

En este subapartado se describen los datos referidos a las características del tráfico, los cuales hacen referencia a las diversas circulaciones que se producen en la intersección durante el periodo de estudio. Es importante tener en cuenta que los conceptos de Demanda de vehículos a motor, Giros a la derecha durante la fase roja, y Flujo de

bicicletas ya fueron definidos en el apartado anterior, por lo que no se volverán a comentar en este.

### **Giros a la izquierda permitidos**

Este valor se define como el número de vehículos que giran a la izquierda de forma permitida dividido por la duración del periodo de análisis. Se expresa como un flujo horario, aunque puede representar periodos de estudio inferiores a una hora.

Estos movimientos pueden ocurrir tanto en el modo permitido de giro a la izquierda como en el modo permitido-protegido, siendo el valor de este parámetro en caso de modo permitido igual a la demanda.

En caso de actuar en modo permitido-protegido, el valor debe ser medido in situ, pues se ve influido por diversos factores.

### **Velocidad media del percentil 85**

Este valor representa la velocidad media de los vehículos cuya velocidad únicamente es superada por el 15% del total de vehículos registrados. Además, se ha de tener en cuenta que la velocidad objeto de estudio es la de los vehículos que circulan a lo largo de la calle en el acceso a la intersección que se esté analizando. Así, se ha de medir en un punto suficientemente alejado de la intersección, con el fin de que la velocidad no se vea influenciada por la presencia de ésta. Debido a que la velocidad se verá claramente influida por las condiciones del tráfico de cada instante, es importante que se refieran las medidas a la situación del tráfico durante el periodo de análisis.

### **Flujo de peatones**

Este valor se obtiene mediante la división del total de peatones que circulan a lo largo de cada esquina de la intersección por la duración del periodo de análisis. Al igual que en casos anteriores, se expresa como un flujo horario, aunque puede representar periodos de estudio de duración inferior a una hora. Este flujo ha de calcularse para los cinco movimientos producidos en cada una de las esquinas de la intersección, siendo estos cinco movimientos los que se muestran en la ilustración 10.

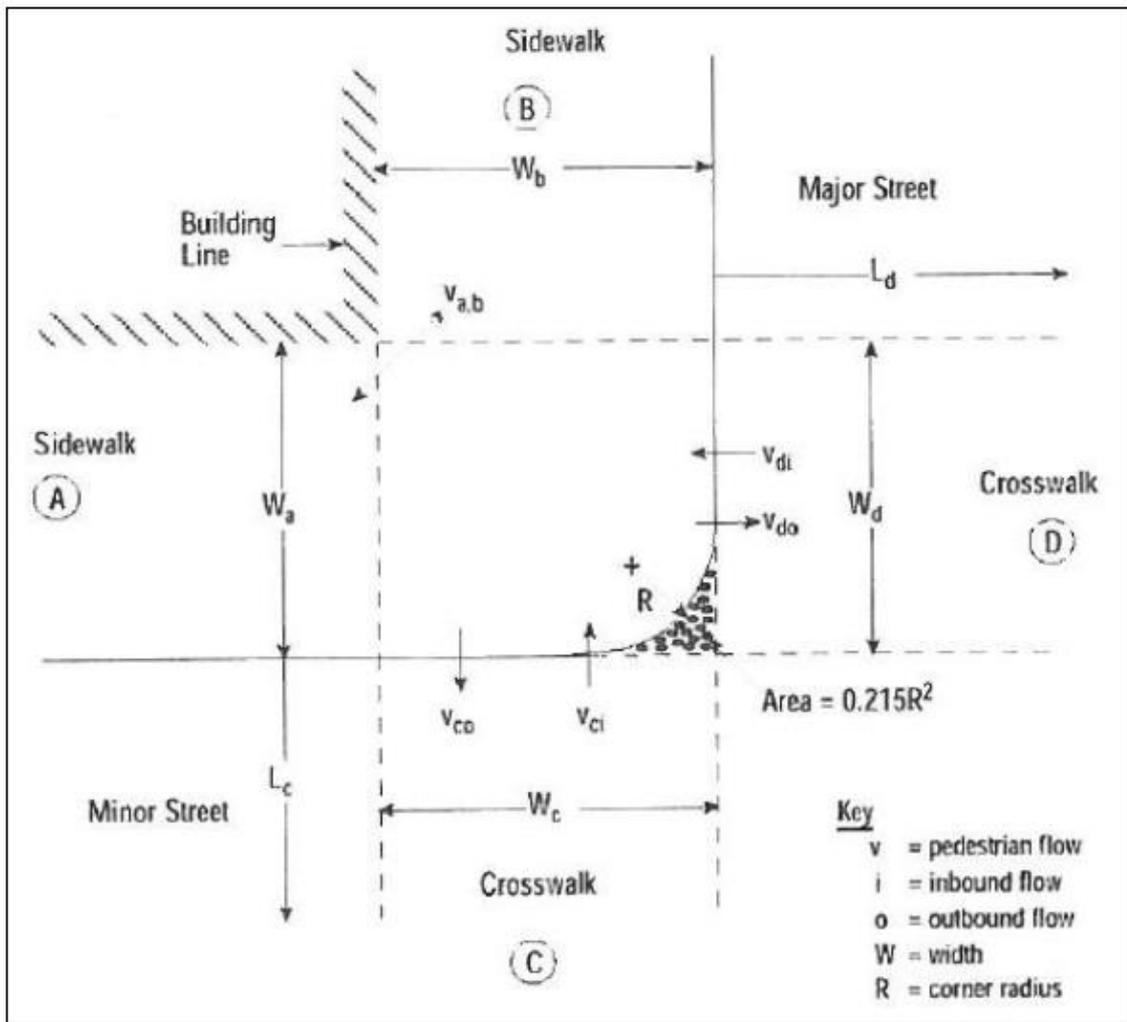


Ilustración 10. Movimiento de peatones y geometría de una esquina de intersección. Fuente: HCM 2010

### Proporción de aparcamiento ocupado

Esta variable representa la proporción del espacio del lado derecho en el que está permitido aparcar que se encuentra ocupada por vehículos estacionados a lo largo del periodo de análisis. Se basa en dos zonas contiguas a la intersección, una situada antes de llegar a esta, con una longitud de aproximadamente 76 metros y otra emplazada tras la intersección, con una longitud igual que la anterior. Así, en caso de que el aparcamiento no esté permitido 76 metros antes ni después de la intersección, el valor de esta variable será 0.

### **3.1.3.2.2. Datos geométricos**

En este apartado se describen los parámetros geométricos expuestos en la tabla 6. Estos datos describen los elementos geométricos del diseño que afectan al funcionamiento de la intersección desde el punto de vista de los peatones o los ciclistas. Al igual que ocurría en el apartado anterior, uno de los parámetros ya ha sido descrito con anterioridad en el método para automóviles, concretamente el Número de carriles, por lo que no se vuelve a analizar.

#### **Ancho de la calle**

Representa el ancho de la calle cruzada por los peatones, medido a lo largo del carril exterior de los vehículos entre los límites de la acera de la calle que se cruza, en el acceso a la intersección que se esté estudiando. Se mide para cada uno de los accesos a la intersección.

#### **Ancho del carril de movimiento de paso, Ancho del carril bici y Ancho del arcén**

Estos datos se corresponden con diversos elementos de la sección transversal de la calle. Entre ellos podemos encontrar el ancho del carril exterior para vehículos que realicen el movimiento de paso por la intersección, el ancho del carril bici contiguo al carril exterior y el ancho del arcén asfaltado exterior.

El ancho de estos elementos es exclusivo, es decir, no se superpone. Además, es importante tener en cuenta que el ancho del carril exterior no incluye el ancho de la zona de drenaje contigua a dicho carril.

#### **Ancho de la zona de paso total, Ancho y longitud del paso de peatones y Radio de la esquina**

Estos datos describen las características geométricas de las zonas de alojamiento de los peatones en las esquinas de cada intersección. Se pueden observar en la ilustración 10.

El ancho total de la zona de paso ( $W_a$  y  $W_b$  en la ilustración 10) es medido desde el borde exterior de la carretera hasta el punto más lejano de la acera, normalmente definido por edificios. Es decir, mide el ancho máximo de la acera.

El ancho del paso de peatones ( $W_c$  y  $W_d$  en la ilustración 10) es una medida del ancho efectivo. A no ser que se registre una restricción para el ancho efectivo, este ha de ser

igual que el ancho físico. Algunos tipos de restricciones serían la presencia de vehículos invadiendo el paso de peatones con cierta regularidad o la aparición de elementos que obstruyan el paso en una mediana.

Por último, la longitud del paso de peatones ( $L_c$  y  $L_d$  en la ilustración 10) es medida de acera a acera, o en caso de no haberla, de borde exterior a borde exterior de la calzada a lo largo de las marcas peatonales.

### **3.1.3.2.3. Datos de la señalización**

En este apartado se describen los conceptos mostrados en la tabla 3 relacionados con la señalización. El intervalo de comienzo de la marcha, el de salida de peatones de peatones, la fase ámbar y el tiempo de despeje ya han sido expuestos con anterioridad, por lo que no se hará referencia a ellos en este apartado.

#### **Prolongación de “Caminar”**

Una fase con el modo de prolongación de la señal caminar habilitado puede extender dicha señalización hasta que no se produzcan actuaciones conflictivas.

Este modo puede estar habilitado para cualquier fase que actúe bajo un controlador accionado, pues es necesario poder detectar los movimientos conflictivos con el paso de peatones. Normalmente, este modo no suele estar habilitado, por lo que los intervalos de comienzo de la marcha (Señal de “Caminar”) y de salida de peatones tomarán su valor de los ajustes.

#### **Duración de ciclo**

La duración del ciclo viene predeterminada para las intersecciones con control de señalización con tiempos fijos o coordinado-accionado. Un valor razonable para esta duración se puede calcular mediante los procedimientos aportados en el capítulo 31 de la HCM.

Para las señalizaciones mediante controladores accionados y semiaccionados, se debe proporcionar una duración media del ciclo para el empleo de las metodologías de peatones y bicicletas. No obstante, este valor puede estimarse mediante la metodología para automóviles.

#### **Presencia de semáforos para peatones**

La presencia de semáforos para peatones influye el comportamiento de los peatones que cruzan la intersección. En caso de haberlo, se asume que los viandantes emplearán los pasos de peatones durante la señalización fija de pasar y la señal intermitente de no pasar. Por otro lado, en caso de no haber semáforo, los peatones cruzarán durante la indicación verde del tráfico de vehículos.

### **Duración de fases de servicio a peatones y bicicletas**

La duración de las fases para peatones y bicicletas es un dato de entrada necesario. Normalmente esta fase se corresponde con la que da servicio al movimiento de paso de vehículos paralelo al flujo de peatones y bicicletas que se esté estudiando.

#### **3.1.4. Ámbito de aplicación del método**

En esta sección se identifican las diferentes condiciones necesarias para la aplicación de las metodologías presentadas anteriormente, es decir, el método para automóviles, el método para peatones y el método para bicicletas. Éstas serán las siguientes.

- Intersecciones señalizadas. Todos los métodos pueden emplearse para evaluar el funcionamiento de la intersección desde los diversos puntos de vista de cada modo de viaje. El método para automóviles se ha desarrollado para intersecciones con controladores totalmente accionados por el tráfico, sin embargo, se pueden emplear una serie de datos iniciales específicos con el fin de estudiar intersecciones con el resto de tipos de controladores de señalización.
- Condiciones de flujo permanente. Los tres métodos están basados en el análisis de flujos de tráfico estables y, por tanto, no se adaptan bien a condiciones variables de tráfico provocadas por ejemplo por atascos, colas, etc.
- Usuarios objetivo. Colectivamente, los tres métodos se desarrollan para estimar el nivel de servicio percibido por los conductores de automóviles, peatones y ciclistas. Por tanto, no están desarrollados para proporcionar una estimación del nivel de servicio desde el punto de vista de otros usuarios de las carreteras, como conductores de vehículos comerciales, pasajeros de los automóviles, conductores de camiones de reparto o conductores de vehículos recreativos. Sin embargo, se considera que la percepción de estos usuarios está bastante bien representada por la de los usuarios a los que va destinado el método.

- Modos de viaje objetivo. El método para automóviles está dirigido a los viajes en automóviles, motocicletas y camiones, aunque los automóviles representan un porcentaje muy elevado dentro de todos los vehículos. Los métodos para peatones y bicicletas van dirigidos a los viajes a pie y en bicicleta respectivamente.
- Influencias en el área de circulación. La percepción de la calidad del servicio prestado por las intersecciones que perciben los usuarios se encuentra influenciada por diversos factores tanto interiores como exteriores al área de circulación. Sin embargo, el método desarrollado en esta normativa está diseñado para únicamente tener en cuenta aquellos factores que se encuentren dentro del área destinada al tránsito de los usuarios, excluyendo los obstáculos que se encuentren fuera de ésta, como edificios, parkings, jardines y demás elementos que podría influir sobre la perspectiva de los usuarios. Este enfoque se toma porque todos los aspectos no tenidos en cuenta comentados anteriormente, no dependen directamente de las agencias que se encargan de los estudios y los diseños de planificación de las intersecciones.
- Enfoque para el método de los peatones: Peatones comunes. El método empleado para los peatones no está diseñado para reflejar la percepción de ningún subgrupo en particular de peatones o para peatones con alguna discapacidad. Por ello, las medidas del rendimiento obtenidas no se usan como indicadores para otras normativas relacionadas con accesibilidad a aceras u otras características en las que sea importante tener en cuenta el tipo de peatón al que se le está prestando servicio.

### **3.1.5. Limitaciones del método**

En general, los métodos descritos en el HCM se pueden emplear para evaluar el funcionamiento de la mayoría de corrientes de tráfico que circulan a través de una intersección. Sin embargo, los métodos no están dirigidos a todas las condiciones de tráfico o a todas las configuraciones existentes para las intersecciones, siendo esta característica de no poder responder ante todas las condiciones o configuraciones la principal limitación del método.

Así, en este apartado se identifican las limitaciones para las metodologías descritas. Además, es importante tener en cuenta que si una o más de estas limitaciones tiene una

influencia importante sobre el funcionamiento de una intersección, el analista debería considerar el empleo de métodos o herramientas alternativas para desarrollar el análisis.

### **3.1.5.1. Automóviles**

El método desarrollado para los automóviles no tiene en cuenta el efecto de las siguientes condiciones u operaciones de la intersección:

- Desbordamiento de la zona destinada a realizar la operación de giro
- Múltiples detectores en el mismo carril
- Demandas previas debidas a intersecciones anteriores cercanas a la que se estudia
- Colas producidas en la intersección por intersecciones posteriores
- Colas producidas en la intersección por intersecciones anteriores
- Finalización prematura de una fase debido a una longitud de detección corta, a un tiempo de paso excesivamente pequeño, o a una combinación de ambas
- Predicción del volumen de giro a la derecha en fase roja o el retraso resultante
- Giros servidos por más de dos carriles exclusivos
- Giros a la derecha que no se produzcan bajo control de señalización
- Carriles de paso añadidos justo antes de la intersección o eliminados justo tras la intersección
- Almacenamiento de vehículos en carriles compartidos de giro a la izquierda dentro de la intersección, con la finalidad de permitir realizar el movimiento de paso a los vehículos que circulan por el mismo carril

Además de las condiciones anteriores, el método no tiene en cuenta de manera directa las siguientes funciones de los controladores:

- Modo de parada para peatones en fases no coordinadas o accionadas
- Preferencias o modos prioritarios
- Superposición o solape de fases
- Reducción de intervalos o ajustes iniciales de las variables para fases accionadas

### **3.1.5.2. Modos no motorizados**

En este apartado se enumeran las limitaciones de los métodos para peatones y bicicletas. Éstos no están capacitados para modelar las siguientes condiciones.

- Pendientes de rasante mayores del 2%
- Presencia de cruces de ferrocarril
- Además, el método para peatones no modela las siguientes condiciones
- Aceras no pavimentadas
- Canalizaciones libres de giros a la derecha con múltiples carriles u operaciones de velocidad elevada

## **3.2. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL HCM**

### **3.2.1. Visión general**

En este apartado se describen las tres metodologías existentes para llevar a cabo la evaluación del funcionamiento de la intersección, correspondiéndose cada uno de ellos con uno de los posibles modos de viaje explicados con anterioridad. Así, el analista debe elegir la combinación de métodos que más le convenga en función de las necesidades del estudio.

Una evaluación completa del funcionamiento de la intersección incluirá por tanto el estudio por separado de todos los modos de viaje relevantes, realizando las medidas para cada uno de ellos de forma independiente, pues no existe ningún tipo de combinación numérica para obtener un valor de rendimiento general de la intersección. Por tanto, se tendrá un valor para cada modo. Con este enfoque se asegura que todos los impactos sobre el funcionamiento se tienen en cuenta desde todos los puntos de vista.

Desde el punto de vista particular de este TFM se ha de aclarar que se hará hincapié en el método empleado para el cálculo del nivel de servicio de los automóviles, puesto que éste será el desarrollado en los casos prácticos

### **3.2.2. Automóviles**

En este punto se da una visión general del método empleado para la evaluación de las intersecciones desde el punto de vista de los automóviles. Este método es computacionalmente complejo, por lo que requiere de softwares informáticos para implementarlo. Esta complejidad se deriva, en parte, de la necesidad de modelizar la operación de la intersección bajo señalización accionada. No obstante, como en nuestro caso se emplearán intersecciones con ciclos de señalización de tiempos fijos o

preprogramados, la dificultad de aplicación del método será menor. Además, es importante tener en cuenta que como ya se ha señalado con anterioridad en el presente TFM los valores empleados por defecto se aportan en el punto 3 del capítulo 18 de la HCM, “Aplicaciones” y serían empleados en los análisis de planificación, en los cuales no se pueden conocer los datos reales de campo.

Por otro lado, conviene señalar que existen métodos menos caros desde el punto de vista computacional para realizar una primera estimación del funcionamiento de la intersección, los cuales son descritos en el capítulo 31 del HCM, sin embargo, en este trabajo no se recogen.

Así, el objetivo de este apartado es introducir al analista en el proceso de cálculo, y estudiar los procedimientos empleados.

### **3.2.2.1. Estructura de cálculo**

En la ilustración 11, extraída del HCM, se muestra la estructura de cálculo empleada para el método de los automóviles. En ella se muestran las secuencias de cálculo a seguir para estimar las medidas del funcionamiento de la intersección seleccionada, tanto para señalización preprogramada o con tiempos fijos como para controladores accionados por el propio tráfico.

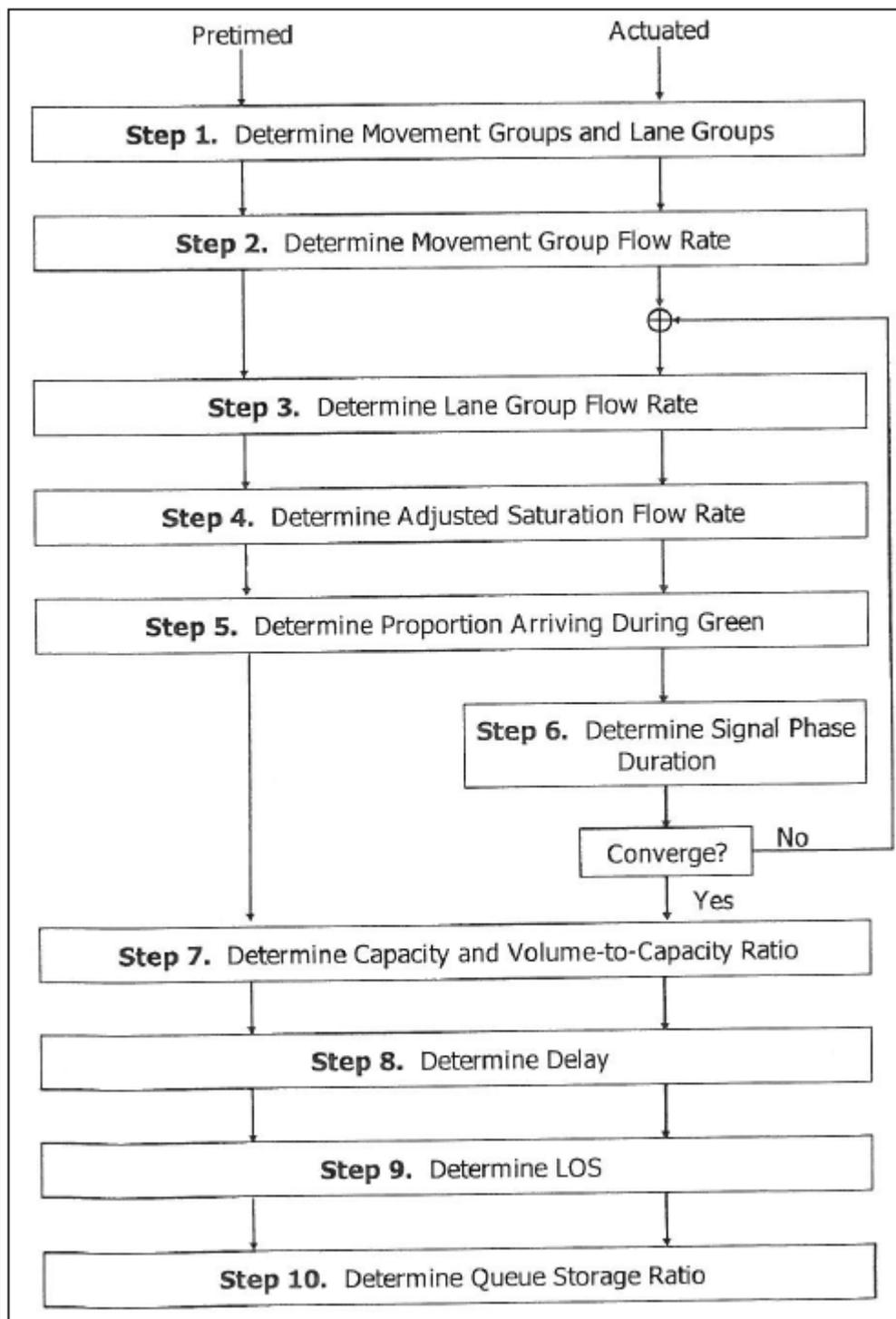


Ilustración 11. Esquema de trabajo del método para automóviles. Fuente: HCM 2010

Como en nuestro caso emplearemos el método de cálculo para intersecciones con señalización preprogramada o de tiempos fijos, se seguirá el árbol de trabajo de la izquierda, en el cual no es necesario realizar iteraciones y además se podrá omitir el paso

6. No obstante, para un análisis en mayor profundidad en este apartado teórico se presentarán todos los pasos, incluyendo los exclusivos de los sistemas de señalización que actúen bajo detectores de tráfico.

### **Paso 1. Determinar grupos de movimiento y de carriles**

Los métodos de evaluación del rendimiento de intersecciones emplean los conceptos de grupos de movimientos y grupos de carriles. La designación de estos dos grupos es muy parecida, encontrándose diferencias cuando se registran carriles compartidos en alguno de los accesos a la intersección que cuenten con dos o más carriles.

Para determinar los grupos de movimiento se emplean las siguientes reglas en cada uno de los accesos a la intersección.

- Un movimiento de giro que sea servido por uno o más carriles exclusivos debe ser designado como un grupo de movimiento.
- Los carriles no asignados a un grupo por la regla anterior han de combinarse en un grupo de movimiento.

Estas reglas dan como resultado la posibilidad de designar hasta tres grupos de movimiento para cada uno de los accesos a la intersección, que serán los siguientes:

- Grupo de movimiento de giro a la izquierda, desde carril exclusivo.
- Grupo de movimiento de giro a la derecha, desde carril exclusivo.
- Grupo de movimiento de paso desde carril exclusivo y/o giros a la derecha o izquierda, desde carriles compartidos.

Por otro lado, el concepto de grupo de carriles se emplea cuando encontramos algún carril compartido en uno de los accesos a una intersección con dos o más carriles. Diversos procedimientos del método requieren algún tipo de información sobre si los carriles compartidos sirven a distintos vehículos o si se comportan como carriles de giro exclusivo. Este problema no puede resolverse hasta que se mide la proporción de vehículos que giran en el carril compartido. Así, cuando la proporción sea igual a 1, es decir, que el 100% de los vehículos que circulan por el carril compartido giran, se considerará el carril como un carril exclusivo de giro.

Para determinar los grupos de carriles se pueden emplear las siguientes reglas en cada uno de los accesos a la intersección.

- Uno o más carriles exclusivos de giro a la izquierda deben designarse como un grupo. Con los carriles de giro a la derecha se actúa del mismo modo.
- Los carriles compartidos deben designarse como un grupo.
- Los carriles desde los que no se lleven a cabo movimientos de giro han de combinarse en un único grupo restante, es decir, los carriles desde los que se desarrolle el movimiento de paso.

De este modo, se pueden obtener uno o más de los siguientes grupos de carriles para cada acceso a las intersecciones.

- Carril o carriles exclusivos de giro a la izquierda
- Carril o carriles exclusivos de paso
- Carril o carriles exclusivos de giro a la derecha
- Carril compartido de giro a la izquierda y de paso
- Carril compartido de giro a la izquierda y giro a la derecha
- Carril compartido de giro a la derecha y de paso
- Carril compartido de giro a la izquierda, de paso y de giro a la derecha

El método puede aplicarse a cualquier combinación lógica de los casos anteriores de grupos de carriles o de movimiento, siendo algunas de las más comunes las que se muestran en la ilustración 12, extraída del HCM.

Number of Lanes	Movements by Lanes	Movement Groups (MG)	Lane Groups (LG)
1	Left, thru., & right:	MG 1:	LG 1:
2	Exclusive left: Thru. & right:	MG 1: MG 2:	LG 1: LG 2:
2	Left & thru.: Thru. & right:	MG 1:	LG 1: LG 2:
3	Exclusive left: Exclusive left: Through: Through: Thru. & right:	MG 1: MG 2:	LG 1: LG 2: LG 3:

Ilustración 12. Combinaciones usuales de grupos de carriles y de movimiento. Fuente: HCM 2010

### Paso 2. Determinación del flujo de los grupos de movimiento

En este paso se determina el volumen de demanda de cada uno de los grupos de movimiento identificados en el paso anterior.

A la hora de aplicar el método en estudios de planificación para intersecciones con duración de fases preprogramadas, como es nuestro caso, este paso no es de gran importancia puesto que se trabaja directamente con la demanda por grupos de carriles. No obstante, puede resultar interesante obtener este dato a modo de visión general del comportamiento de los vehículos dentro de cada uno de los accesos a la intersección.

### Paso 3. Determinación del flujo de los grupos de carriles

En este apartado se fija el volumen de tráfico de cada uno de los grupos de carriles, el cual se obtendrá de los aforos de tráfico para análisis operacionales o se calculará para los análisis de proyecto y planificación.

Si hubiera que calcularlo, en caso de que haya uno o más carriles compartidos y dos o más carriles en el acceso, la demanda del grupo de carril se obtendrá siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 31 del HCM, el cual se basa en que los conductores

escogerán para circular el carril que minimice el tiempo que éstos están circulando por la intersección, empleándose el valor del ratio volumen-saturación para estimar las diferencias relativas entre los tiempos de los diversos carriles. Sin embargo, este criterio no puede mantenerse siempre, pues en algunas situaciones los conductores se sitúan en un carril con la finalidad de posicionarse para facilitar un movimiento en una intersección posterior, por lo que, en estos casos, el analista deberá sumar al valor del flujo por grupo de carril inicial el valor del ratio de vehículos que se posicionen por conveniencia para un movimiento posterior para obtener la verdadera tasa.

No obstante, cabe recordar que en estudios de intersecciones existentes bastará con registrar la demanda de tráfico de cada uno de los grupos de carril para llevar a cabo el estudio, no siendo necesaria la aplicación de métodos o interpretaciones complementarias.

#### **Paso 4. Determinación del flujo de saturación ajustado**

En este apartado se calcula un valor ajustado para el flujo de saturación, para lo cual se emplea el flujo base de saturación como dato de partida. Este nuevo valor recibe la denominación de flujo “ajustado” porque para su cálculo se emplean diversos factores correctores que reflejan las condiciones particulares de cada acceso a la intersección.

El procedimiento descrito a continuación para el cálculo del flujo ajustado de saturación se emplea para grupos de carril con carriles exclusivos para un movimiento que actúan en modo protegido y preprogramado, los cuales no han de tener interacción con peatones o bicicletas. En caso de que estas condiciones no se mantengan, bien sea porque se trata de un grupo de carril compartido por dos o más movimientos, porque se trate de operaciones permitidas influidas por el flujo en sentido contrario o porque haya peatones o bicicletas influyendo al tráfico de vehículos, el método ha de combinarse con los procedimientos complementarios descritos en el capítulo 31 del HCM, mediante los cuales se tienen en cuenta dichas situaciones a fin de obtener un flujo de saturación ajustado más preciso.

Así, para el cálculo del flujo de saturación por carril para el grupo de carriles que se esté analizando, se emplea la siguiente ecuación.

$$S=S_0 \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} \cdot f_{RT} \cdot f_{LT} \cdot f_{Lpb} \cdot f_{Rpb}$$

Donde:

- $s$ : Flujo ajustado de saturación (veh/h·carril)
- $s_0$ : Flujo base de saturación (veh de pasajeros/h·carril)
- $f_w$ : Factor de ajuste por ancho de carril
- $f_{HV}$ : Factor de ajuste de vehículos pesados
- $f_g$ : Factor de ajuste de pendiente del acceso
- $f_p$ : Factor de ajuste por existencia de carriles para aparcar o maniobras de aparcamiento adyacentes al grupo de carriles
- $f_{bb}$ : Factor de ajuste de atascos debidos a paradas de autobuses dentro de la intersección
- $f_a$ : Factor de ajuste por tipo de área
- $f_{LU}$ : Factor de ajuste por utilización del carril
- $f_{RT}$ : Factor de ajuste por presencia de vehículos que giren a la derecha
- $f_{LT}$ : Factor de ajuste por presencia de vehículos que giren a la izquierda
- $f_{Lpb}$ : Factor de ajuste de peatones para grupos de giro a la izquierda
- $f_{Rpb}$ : Factor de ajuste de peatones y bicicletas para grupos de giro a la derecha

### **Flujo base de saturación $s_0$**

Los cálculos comienzan con la selección de un flujo base de saturación, el cual representa el flujo medio esperado para un carril de paso, con condiciones de tráfico y geometría tales que los diversos valores de los coeficientes de ajuste anteriormente expuestos serían igual a 1. Habitualmente, se selecciona un mismo valor de flujo base para todas las intersecciones semaforizadas que se encuentren en la misma zona que la que se está estudiando, puesto que el único criterio seguido para la selección del valor de  $s_0$  es la población del área en la que se sitúa la intersección.

Los valores por defecto empleados para este parámetro son los siguientes:

- Si la intersección se sitúa en un núcleo urbano con una población igual o superior a 250.000 habitantes,  $s_0 = 1900$  veh de pasajeros/h·carril
- En otro caso,  $s_0 = 1750$  veh de pasajeros/h·carril

### Ajuste por ancho de carril $f_w$

El factor de ajuste por ancho de carril  $f_w$  tiene en cuenta tanto el efecto negativo sobre el flujo de saturación de la existencia de carriles estrechos, como el efecto positivo de carriles que posean un ancho elevado. Los valores de este factor son los representados en la tabla 7.

Tabla 7. Factor de ajuste por ancho de carril. Fuente HCM 2010

Ancho medio del carril (m)	Factor de ajuste $f_w$
< 3.0*	0.96
≥ 3.0 – 3.92	1.00
> 3.92	1.04

Nota : El factor se aplica a carriles con ancho medio superior a 2.45 metros

Los carriles standard son de 3.65 metros. En caso de carriles con anchos superiores a 4.85 metros se puede emplear este factor corrector con precaución, o bien analizar la situación con dos carriles estrechos. No obstante, esta segunda opción siempre aportará un resultado peor (flujo de saturación mayor) que la primera. En cuanto al ancho mínimo para emplear este factor, no se llevará a cabo la corrección cuando el ancho medio del grupo de carril sea inferior a 2.45 metros.

### Ajuste por vehículos pesados $f_{HV}$

El factor de ajuste por vehículos pesados tiene en cuenta el espacio adicional ocupado por éstos en relación a los vehículos genéricos de pasajeros, así como la diferencia en sus capacidades de operación. Es importante tener en cuenta que este factor se basa en aquellos vehículos con más de cuatro ruedas apoyadas sobre el pavimento de manera simultánea, omitiendo los vehículos de transporte público que se detienen en la intersección. Para calcularlo se emplea la siguiente ecuación.

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_{HV}(E_T - 1)}$$

Donde:

- $P_{HV}$ : Porcentaje de vehículos pesados en el grupo (%)
- $E_T$ : Número de vehículos de paso equivalente a cada vehículo pesado = 2

### Ajuste por pendiente $f_g$

El valor de este factor introduce el efecto de la pendiente del tramo de acceso a la intersección sobre el funcionamiento de esta. Para calcularlo se emplea la siguiente ecuación.

$$f_g = 1 - \frac{P_g}{200}$$

Donde:

- $P_g$ : Pendiente del acceso (%)

Este factor se aplica para pendientes dentro de un rango que va desde el -6% hasta el +10%, teniendo las pendientes negativas un efecto positivo sobre el funcionamiento de la intersección, y viceversa.

### **Ajuste por aparcamiento $f_p$**

Este factor tiene en cuenta el efecto que produce sobre un grupo de carril la existencia de un carril contiguo para el aparcamiento. Además, introduce el efecto de los posibles bloqueos de carril debidos a las maniobras de entrada y salida en los huecos para aparcar.

En caso de que no exista la posibilidad de aparcar, el valor del factor será 1, pero si existe algún aparcamiento adyacente al carril, el factor se calculará mediante la siguiente expresión.

$$f_p = \frac{N - 0.1 - \frac{18 \cdot N_m}{3600}}{N} \geq 0.05$$

Donde:

- $N_m$ : ratio de maniobras en el carril adyacente (maniobras/h)
- $N$ : número de carriles en el grupo (carriles)

El valor de  $N_m$  se obtiene para las áreas adyacentes al grupo de carriles y dentro de una zona delimitada por una distancia de 76 metros medida desde la línea de detención. Se considerará un valor máximo para  $N_m$  de 180 maniobras/hora y un valor mínimo de  $f_p$  de 0.05. En cuanto al bloqueo del tráfico, se considera que cada maniobra, tanto de entrada como de salida, tiene una duración media de 18 segundos.

Debido a que el factor se aplica únicamente al grupo de carriles que se encuentran situados junto a las zonas de aparcamiento, en calles de una única dirección con un único grupo de carriles, el número de maniobras empleado será el correspondiente a las producidas en ambos lados. En calles de un único sentido con dos o más grupos de carriles, el factor se calcula por separado para cada grupo de carril y emplea el número de maniobras del lado al que dicho grupo sea adyacente.

Por último, es importante resaltar que la inexistencia de zonas de aparcamiento tiene un efecto diferente que una zona con cero maniobras, pues como ya se ha señalado el factor tiene en cuenta la propia existencia de la zona además de las maniobras efectuadas, y si se observa la fórmula y se sustituye el valor de  $N_m$  por 0 se obtendrá un valor distinto de 1 para  $f_p$ , que sería el valor adecuado para las zonas sin posibilidad de aparcamiento.

#### **Ajuste por bloqueo de autobuses $f_{bb}$**

Este factor tiene en cuenta los efectos de la maniobra de parada para recoger o descargar pasajeros de los vehículos de transporte público producidas entre la intersección y una línea situada a 76 metros antes y después de ésta. Para su cálculo se emplea la siguiente ecuación.

$$f_{bb} = \frac{N - \frac{14,4 \cdot N_b}{3600}}{N} \geq 0,05$$

Donde:

- $N_b$ : Ratio de paradas de bus en la zona de estudio (paradas bus/h)
- $N$ : Número de carriles en el grupo (carriles)

Este factor se emplea únicamente en los grupos de carriles que son bloqueados por las paradas de los autobuses, y tiene un límite superior para  $N_b$  de 250 buses/h y un valor mínimo de 0,05. Además, se asume que el tiempo de retención medio debido a las paradas de los vehículos de transporte público es de 14.4 segundos.

#### **Ajuste por tipo de área $f_a$**

Este factor considera la ineficiencia de las intersecciones situadas en zonas de negocios en relación a las situadas en otras zonas. Cuando se emplea, su valor es de 0.9.

El empleo de este parámetro debe determinarse para cada caso en particular, pues su empleo no está limitado únicamente para áreas clasificadas como CBD (distritos centrales de negocios) ni es obligatorio emplearlo en dichas áreas. En su lugar, ha de emplearse en aquellas zonas en las que o bien por las condiciones geométricas o por las condiciones del flujo de peatones y de tráfico o por ambas, los intervalos entre los vehículos se vean aumentados significativamente.

### **Ajuste por uso de carril $f_{LU}$**

Este dato se emplea para estimar el flujo de saturación para grupos de carriles con más de un carril exclusivo. Si el grupo de carriles tiene un carril compartido o un carril exclusivo, el valor del factor es igual a 1.

### **Ajuste por giros a la derecha $f_{RT}$**

Este factor refleja el efecto de la geometría de los giros a la derecha sobre el flujo de saturación. Para calcularlo se emplea la siguiente ecuación.

$$f_{RT} = \frac{1}{E_R}$$

Donde:

- $E_R$ : Número de vehículos de paso equivalente a cada vehículo que gira a la derecha en fase protegida = 1.18

Si el giro a la derecha comparte carril con algún otro movimiento o es una operación permitida en lugar de protegida, el procedimiento empleado para el cálculo del flujo de saturación ajustado es el descrito en el capítulo 31 del HCM para grupos de carriles compartidos.

En este punto se hace importante resaltar que el procedimiento expuesto en el capítulo 31 del manual de capacidad americano será detallado con posterioridad, concretamente en el apartado de los cálculos correspondientes a los casos prácticos analizados, puesto que, al tratarse de un proceso de cálculo específico condicionado por las características propias de cada caso concreto, su exposición en este punto carecería de sentido.

### **Ajuste por giros a la izquierda $f_{LT}$**

El concepto es muy similar al anterior, teniendo en cuenta en este caso la geometría de los giros a la izquierda. La ecuación para calcularlo es la siguiente.

$$f_{LT} = \frac{1}{E_L}$$

Donde:

- $E_L$ : Número de vehículos de paso equivalente a cada vehículo que gira a la izquierda en fase protegida = 1.05

Al igual que en el giro a la derecha, si el giro a la izquierda comparte carril con algún otro movimiento o es una operación permitida en lugar de protegida, el procedimiento empleado para el cálculo del flujo de saturación ajustado es el descrito en el capítulo 31 de la HCM para grupos de carriles compartidos.

Del mismo modo que en el caso anterior, el procedimiento concreto para el cálculo de los casos de estudio se detallará en capítulos posteriores.

#### **Ajustes por peatones y bicicletas $f_{Lpb}$ y $f_{Rpb}$**

El procedimiento para determinar los factores de ajuste debidos a los peatones y bicicletas sobre los giros a la derecha (ambos) y a la izquierda (solo peatones) se basa en el concepto de la ocupación de la zona de conflicto entre los diversos movimientos, el cual tiene en cuenta los problemas entre los tres modos de transporte.

Así, se tendrá en cuenta la interferencia entre las trayectorias de los vehículos, bicicletas y peatones que circulen simultáneamente por cualquier zona de la intersección, a fin de determinar la afección de dicha confluencia sobre el tiempo de actuación de los diferentes modos de transporte en el interior del nudo.

Para el cálculo del tiempo durante el cual los vehículos, los peatones y las bicicletas mantienen ocupada la zona de conflicto entre sus movimientos, se emplean datos como las demandas de cada uno de los movimientos o el número de carriles emisores y receptores de los movimientos de giro que se realicen.

El procedimiento para el cálculo de estos factores se encuentra detallado en el capítulo 31 del HCM, sin embargo, al contrario que el correspondiente a los dos factores anteriores es un proceso único, con escasa variación en función de cada caso concreto. Por ello, y a

fin de aportar una información lo más completa posible, se recogen en el presente apartado sus puntos principales.

Así, con carácter previo a la presentación de la guía para el cálculo de dichos factores, se ha de tener en cuenta que el procedimiento de cálculo distingue dos situaciones, el cálculo de los factores de afección de peatones y bicicletas para giros a la derecha e izquierda (en este último caso solo peatones) desde calles de un único sentido y el cálculo del factor de afección de peatones para giros a la izquierda que se realicen como operación protegida-permitida.

Además, se aportan las siguientes observaciones para el factor de peatones de giros a la izquierda:

- Si no existen peatones en conflicto con el movimiento de giro, el valor de  $f_{Lpb}$  será igual a 1.
- Si el grupo de carriles se sitúa en una calle de doble sentido, y la operación se efectúa en modo protegido, el valor de  $f_{Lpb}$  será igual a 1.
- Si el grupo de carriles se sitúa en una calle de doble sentido, y se realiza la operación en modo permitido o protegido-permitido, se ha de emplear el segundo procedimiento de los descritos a continuación de estas líneas.
- Si el grupo de carriles se encuentra en una calle de sentido único, el procedimiento a emplear será el primero de los dos que se encuentran a continuación.

Por otro lado, para el factor de peatones y bicicletas de giros a la derecha se tendrán en cuenta las siguientes afirmaciones:

- Si no existen peatones o bicicletas en conflicto con el movimiento de giro a la derecha, el valor de  $f_{Rpb}$  será igual a 1.
- Si se realiza el giro como una operación protegida, el valor de  $f_{Rpb}$  será igual a 1.
- Si se realiza el giro bajo una operación protegida-permitida, el procedimiento a emplear para el cálculo del valor de  $f_{Rpb}$  será el primero de los dos descritos a continuación.

***Cálculo del factor corrector de giros a la derecha e izquierda con interferencia de peatones y/o bicicletas desde calles de un único sentido.***

i. Determinación del flujo de peatones durante su fase verde.

En este apartado se calcula un valor dependiente de los peatones que cruzan la intersección interfiriendo con el giro que se está estudiando, ponderado por un valor obtenido de dividir la duración del ciclo entre la duración de la señalización verde que da acceso a dichos peatones, tal y como se observa en la siguiente expresión:

$$v_{pedg} = v_{ped} \cdot \frac{C}{g_{ped}} \leq 5000$$

Donde:

- $v_{pedg}$ : Peatones durante la fase verde (peatones/h)
- $v_{ped}$ : Peatones que interfieren con el giro que se está estudiando (peatones/h)
- $C$ : Duración del ciclo (s)
- $g_{ped}$ : Duración del verde para peatones (s)

ii. Determinación de la ocupación media de los peatones.

En este apartado se determina un factor que representa la ocupación media de los peatones de la zona de conflicto de movimientos, teniendo en cuenta que si el valor obtenido en el apartado anterior  $v_{pedg}$  es menor o igual que 1000 peatones/h se emplea la siguiente expresión:

$$OCC_{pedg} = \frac{v_{pedg}}{2000}$$

Mientras que, si  $v_{pedg}$  es superior a 1000 p/h, se emplea la siguiente:

$$OCC_{pedg} = 0.4 + \frac{v_{pedg}}{10000} \leq 0.90$$

Donde:

- $OCC_{pedg}$ : Ocupación de la zona de conflicto por los peatones
- $v_{pedg}$ : Peatones durante la fase verde (peatones/h)

iii. Determinación del flujo de bicicletas durante su indicación verde.

En este punto se realiza el mismo procedimiento que en el punto número 1, pero sustituyendo los valores referentes a peatones por los relacionados con el flujo de bicicletas. Así, la expresión a emplear para el cálculo será la que se muestra a continuación:

$$v_{bicg} = v_{bic} \cdot \frac{C}{g} \leq 1900$$

Donde:

- $v_{bicg}$ : Bicicletas durante la indicación verde (bic/h)
- $v_{bic}$ : Bicicletas en el acceso (bic/h)
- $C$ : Duración del ciclo (s)
- $g$ : Verde efectivo (s)

Como se puede observar, no se diferencia una fase verde para el empleo de bicicletas exclusivamente, sino que su fase verde coincidirá con el verde efectivo de la rama por la que circulen.

iv. Determinación de la ocupación media de las bicicletas

Al igual que en el paso 3, en este se repite el proceso seguido con los peatones, pero sustituyendo los datos por los referentes al flujo de bicicletas. No obstante, en este caso se emplea una única ecuación sea cual sea el valor de  $v_{bicg}$  obtenido, que será la siguiente:

$$OCC_{bicg} = 0.02 + \frac{v_{bicg}}{2700}$$

Donde:

- $OCC_{bicg}$ : Ocupación de la zona de conflicto por las bicicletas
- $v_{bicg}$ : Bicicletas durante la indicación verde (bic/h)

v. Determinación de la ocupación relevante de la zona de conflicto.

En este paso se transforma la ocupación media de los peatones y bicicletas calculadas en los apartados anteriores a una ocupación relevante, obtenida esta última como una combinación de las anteriores. Para ello, se han de tener en cuenta las características de confluencia de los diversos movimientos, existiendo las siguientes posibilidades.

Para giros a la derecha sin interferencia de bicicletas o giros a la izquierda desde calles de un único sentido, se emplea la siguiente ecuación:

$$OCC_r = \frac{g_{ped}}{g} \cdot OCC_{pedg}$$

Donde:

- $OCC_r$ : Ocupación relevante de la zona de conflicto
- $g_{ped}$ : Duración del verde para peatones (s)
- $g$ : Verde efectivo (s)
- $OCC_{pedg}$ : Ocupación de la zona de conflicto por los peatones

Por otro lado, para giros a la derecha con interferencia de peatones y bicicletas, la expresión a emplear será la siguiente:

$$OCC_r = \left( \frac{g_{ped}}{g} \cdot OCC_{pedg} \right) + OCC_{bicg} - \left( \frac{g_{ped}}{g} \cdot OCC_{pedg} \cdot OCC_{bicg} \right)$$

Donde:

- $OCC_r$ : Ocupación relevante de la zona de conflicto
- $g_{ped}$ : Duración del verde para peatones (s)
- $g$ : Verde efectivo (s)
- $OCC_{pedg}$ : Ocupación de la zona de conflicto por los peatones
- $OCC_{bicg}$ : Ocupación de la zona de conflicto por las bicicletas

vi. Determinación del tiempo desocupado de la zona de conflicto.

La determinación del tiempo durante el cual la zona de conflicto se encuentra desocupada depende del número de carriles emisores y receptores del movimiento de giro que se encuentre con las trayectorias de los peatones y bicicletas. Es importante destacar con carácter previo a la exposición de las ecuaciones empleadas para su cálculo que, aunque

se defina como tiempo durante el cual la zona de conflicto no esté ocupada, no se trata de un valor numérico medido en segundos, sino de un factor adimensional.

Así, en función del número de carriles emisores y receptores de los movimientos de giro existen las siguientes posibilidades.

Si el número de carriles receptores es igual al de carriles emisores, los vehículos que se dispongan a realizar el giro no serán capaces de realizar movimientos a fin de evitar a los peatones o bicicletas que ocupen la zona de conflicto, puesto que no tendrán carriles alternativos a los que dirigirse más allá de la prolongación de por el que estén circulando. En este caso, la expresión a emplear para calcular el tiempo que la zona se encuentra desocupada será la siguiente:

$$A_{pbT} = 1 - OCC_r$$

Donde:

- $A_{pbT}$ : Tiempo durante el cual la zona de conflicto se encuentra desocupada
- $OCC_r$ : Ocupación relevante de la zona de conflicto

Por otro lado, si el número de carriles receptores supera al de emisores, los vehículos que realicen el giro podrán maniobrar durante la curva para evitar a los peatones o bicicletas que estén interfiriendo en su trayectoria, suponiendo esta interferencia por tanto un efecto menor que en el caso anterior. La ecuación a emplear en este supuesto será la siguiente:

$$A_{pbT} = 1 - 0.6 \cdot OCC_r$$

Donde:

- $A_{pbT}$ : Tiempo durante el cual la zona de conflicto se encuentra desocupada
- $OCC_r$ : Ocupación relevante de la zona de conflicto

Como se puede observar, la posibilidad de esquivar a los peatones y bicicletas supone una reducción del 40% en la ocupación relevante de la zona de conflicto.

vii. Determinación del factor de ajuste para el flujo de saturación.

Una vez que se han efectuado todos los pasos anteriores, se debe determinar el valor del factor de ajuste que se introducirá en la ecuación del flujo ajustado de saturación, siguiendo las siguientes indicaciones.

Si la operación que se está estudiando es un giro a la derecha, permitido y desde un carril exclusivo, el valor del factor de ajuste será:

$$f_{Rpb} = A_{pbT}$$

Por otro lado, para giros a la derecha durante operaciones protegidas-permitidas desde carriles exclusivos, se ha de emplear un valor de  $f_{Rpb}$  para cada momento de la fase, siguiendo la siguiente regla.

Durante la fase permitida,  $f_{Rpb} = A_{pbT}$ , mientras que durante la fase protegida del giro el valor de  $f_{Rpb}$  será igual a 1.

Por último, para giros a la izquierda, el valor empleado de  $f_{Lpb}$  será igual al calculado para  $A_{pbT}$ , teniendo en cuenta que este proceso solo es válido para giros desde calles de sentido único.

***Cálculo del factor corrector de giros a la izquierda permitidos o protegidos-permitidos con interferencia de peatones.***

En caso de que se esté analizando un grupo de carriles desde los que se realicen giros a la izquierda permitidos o protegidos-permitidos procedentes de una calle de doble sentido, se debe seguir un procedimiento distinto al expuesto anteriormente.

Con carácter previo a su análisis, se ha de tener en cuenta que, al tratarse de giros a la izquierda realizados desde calles de doble sentido, cuando la operación sea permitida, los vehículos que quieran girar deberán ceder el paso a aquellos que circulen por el carril contiguo en sentido opuesto, es decir, a los vehículos que vengan desde la rama opuesta de la intersección desarrollando el movimiento de paso. Una vez que encuentren un hueco que consideren oportuno para cruzar la trayectoria de dichos vehículos, pueden encontrarse con peatones obstruyendo su trayectoria, e incluso, según las características de cada intersección, con vehículos que, partiendo desde la rama opuesta, realicen el movimiento de giro a la derecha.

Así, para el cálculo del factor corrector a aplicar en estos casos se deben realizar en primer lugar los dos primeros pasos descritos en el caso anterior, con el fin de obtener la ocupación de la zona de conflicto de los peatones  $OCC_{pedg}$ . Una vez que se tenga este último dato, el proceso a seguir es el siguiente:

1. Cálculo de la ocupación de los peatones tras la disolución de la cola.

Una vez que se haya disuelto la posible cola de vehículos que realicen el movimiento de paso desde la rama opuesta de la intersección a la que se está estudiando, los vehículos podrían empezar a moverse. Sin embargo, como se ha señalado, es posible que su trayectoria se vea interferida por la presencia de peatones. Por ello, se debe calcular la ocupación de la zona de conflicto por peatones tras la disolución de la cola,  $OCC_{pedu}$ .

Para ello se ha de tener en cuenta el tiempo de servicio a la cola,  $g_q$ , el cual será calculado restando el tiempo de la fase permitida en el que no se producen bloqueos por colas ( $g_u$ ), a la duración total de dicha fase permitida ( $g_p$ ). Es decir,  $g_q = g_p - g_u$ .

Así, si  $g_q < g_{ped}$  la expresión a emplear será la siguiente:

$$OCC_{pedu} = OCC_{pedg} \cdot \left( 1 - 0.5 \cdot \frac{g_q}{g_{ped}} \right)$$

Y en cualquier otro caso:

$$OCC_{pedu} = 0.0$$

Donde:

- $OCC_{pedu}$ : Ocupación de la zona de conflicto por peatones tras la disolución de la cola
- $OCC_{pedg}$ : Ocupación de la zona de conflicto por los peatones
- $g_q$ : Tiempo de servicio a la cola (s). Igual al verde del movimiento que la produce.
- $g_{ped}$ : Duración del verde para peatones (s)

Por tanto, se puede asumir que cuando el tiempo de servicio de la cola supere el tiempo de servicio de los peatones, la disolución del atasco llevará más tiempo del que los peatones tendrán para pasar y por tanto el valor de la ocupación de la zona de conflicto

por parte de éstos tras la disolución del atasco será nula, porque solo la ocuparán durante el tiempo en el que la cola se esté deshaciendo.

## 2. Determinación de la ocupación relevante de la zona de conflicto.

Tras la disolución de la cola opuesta, los vehículos que se dispongan a realizar el giro a la izquierda llevarán a cabo su maniobra siempre y cuando consideren que es posible realizarla en el hueco existente entre dos vehículos sucesivos del tráfico que se desplaza en sentido contrario. Por ello, la ocupación relevante de la zona de conflicto se define como una función de probabilidad dependiente del hueco aceptable por los usuarios y la ocupación de los peatones. Para calcularla se emplea la siguiente ecuación:

$$OCC_r = \frac{g_{ped} - g_q}{g_p - g_q} \cdot (OCC_{pedu}) \cdot e^{\frac{-5 \cdot v_0}{3600}}$$

Dónde:

- $OCC_r$ : Ocupación relevante de la zona de conflicto
- $g_{ped}$ : Duración del verde para peatones (s)
- $g_q$ : Tiempo de servicio a la cola (s)
- $g_p$ : Duración efectiva de la fase de giro a la izquierda permitido (s)
- $OCC_{pedu}$ : Ocupación de la zona de conflicto por peatones tras la disolución de la cola
- $v_0$ : Demanda causante de la cola que se debe deshacer (veh/h)

Para la determinación de  $v_0$  se han de tener en cuenta que debe ser una de las siguientes posibilidades:

- Caso 1:  $v_0$  será igual a la suma de los vehículos que, procedentes de la rama opuesta de la intersección, realicen el movimiento de paso o de giro a la derecha en confluencia con el giro a la izquierda que se esté estudiando.
- Caso 2:  $v_0$  será igual a los vehículos que realicen el movimiento de paso desde la rama opuesta de la intersección y cuya trayectoria cruce con la de los vehículos que realizan el giro a la izquierda que se está analizando.

A la vista de los casos anteriores, se puede deducir que el caso 1 se aplicará por defecto excepto en los siguientes casos, en los cuales se aplicará el caso 2.

- Si existe en la rama opuesta, además del movimiento de paso, un carril exclusivo de giro a la derecha que el analista considera que no influye sobre la aceptación del hueco percibido por los usuarios que se dispongan a girar a la izquierda.
- Si no existen movimientos de giro a la derecha desde la rama opuesta.

### 3. Determinación del tiempo desocupado de la zona de conflicto

Este paso es equivalente al del caso anterior para vías de sentido único, teniendo en cuenta que en este caso se deben considerar los carriles receptores y emisores de giros a la izquierda. Así, se obtendrá el valor de  $A_{pbT}$  mediante el de  $OCC_r$ .

### 4. Determinación del factor de ajuste para el flujo de saturación

Por último, se calcula el valor del factor a introducir en la ecuación del flujo ajustado de saturación teniendo en cuenta la siguiente expresión.

$$f_{Lpb} = A_{pbT}$$

Una vez que se hayan obtenido los valores de todos los factores correctores del flujo ajustado de saturación, y el del propio flujo, se puede pasar al siguiente paso en el método.

## **Paso 5. Determinación de la proporción de llegadas durante la fase verde**

Los retrasos y el tamaño de las colas producidas en una intersección señalizada dependen en gran medida de la proporción de vehículos que lleguen a ella durante la fase verde y la proporción que lleguen durante la fase roja. Así, las demoras y las colas serán menores cuanto mayor sea la proporción de llegadas durante la indicación verde.

Para el cálculo de esta proporción para cada grupo de carriles se emplea la siguiente ecuación.

$$P = R_p \cdot (g/C)$$

Donde:

- $P$ : Proporción de vehículos que llegan durante la fase verde
- $R_p$ : Coeficiente de grupo

- $g$ : Verde efectivo (s)
- $C$ : Duración del ciclo (s)

Los valores de la duración del ciclo y del tiempo efectivo de la fase verde se conocerán cuando la operación de la intersección sea con tiempos fijos. Por ello, cuando la intersección no actúe bajo este tipo de señalización, se calcularán unos valores medios siguiendo los procedimientos del paso 6.

### **Paso 6. Determinación de la duración de las fases de señalización**

La duración de las diferentes fases de la señalización depende del tipo de control empleado. Si la intersección actúa bajo un control preprogramado, la duración de las fases será un valor de entrada y por tanto este paso se podrá omitir. En caso de ser un valor desconocido, se podrá estimar mediante el procedimiento descrito en la sección 2 del capítulo 31 de la HCM.

Si la intersección actúa bajo un control accionado, la duración media de las fases se podrá estimar mediante el procedimiento descrito en la sección 2 del capítulo 31 de la HCM. En dicho capítulo se distingue entre fases accionadas, coordinadas y no coordinadas.

Así, llegados a este punto es útil definir una serie de conceptos claves a la hora de estudiar la duración de las fases. Algunos de estos conceptos son específicos de las operaciones con control accionado, sin embargo, la mayoría son igualmente aplicables para las operaciones preprogramadas.

La duración de una fase accionada se compone de cinco periodos. El primero representa el tiempo perdido mientras que la cola reacciona a la indicación verde de la señal. El segundo intervalo representa el tiempo requerido para que la cola se deshaga. El tercer periodo representa el tiempo durante el cual la indicación verde permanece encendida y al tratarse de señalizaciones accionadas por el tráfico se encuentra condicionado por la llegada de vehículos. Por tanto, este periodo acaba cuando se produce un corte en el tráfico o cuando se alcanza el valor del verde máximo. El cuarto intervalo hace referencia al periodo de cambio de indicación amarilla, y por último, el quinto intervalo representa la duración del tiempo de despeje. Así, la duración de una fase accionada será definida por la siguiente ecuación.

$$D_p = l_1 + g_s + g_e + Y + R_c$$

Donde

- $D_p$ : Duración de la fase (s)
- $l_1$ : tiempo de reacción = 2 (s)
- $g_s$ : tiempo de servicio a la cola (s)
- $g_e$ : Duración del verde (s)
- $Y$ : Duración ámbar (s)
- $R_c$ : Tiempo de despeje (s)

Así, se puede observar que cuando se habla de duración de una fase no se incluye en ella el periodo de tiempo durante el cual la indicación mostrada por los semáforos es la roja, puesto que si no se estaría obteniendo la duración del ciclo completo. La relación entre las variables anteriores y el hecho comentado en la frase anterior se observan con claridad en la ilustración 13, mediante el empleo de un polígono de acumulación de vehículos en cola.

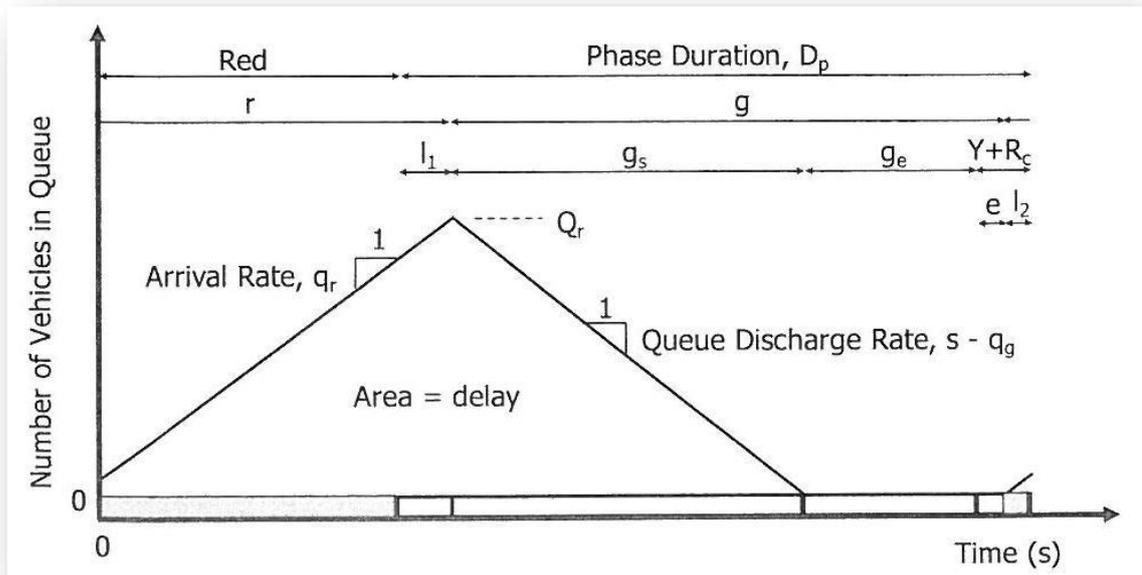


Ilustración 13. Fases durante operación accionada. Fuente HCM 2010

En la ilustración 13 se puede observar la relación entre la duración de las diferentes fases del ciclo de una señalización accionada y el tamaño de las colas producidas. Como se ve, durante la fase roja los vehículos llegan con un ratio igual a  $q_r$  y se almacenan formando una cola. La cola alcanza su máximo tamaño  $l_1$  segundos después de que la indicación

pase a verde, pues durante el tiempo de reacción pueden seguir llegando vehículos a la intersección. Desde este momento, la cola comienza a vaciarse con una tasa igual al flujo de saturación menos la tasa de llegada de vehículos durante la fase verde ( $s - q_p$ ). Cuando han transcurrido  $g_s$  segundos desde que el indicador se puso en verde, la cola se habrá eliminado y el indicador se mantendrá en verde mientras sigan llegando vehículos dentro de los límites seleccionados para la señalización. Así, la fase verde se mantiene hasta que o bien se produce una brecha en la llegada de vehículos o se alcanza el límite de tiempo, coincidiendo esta duración con el valor de  $g_e$ .

El valor del tiempo verde efectivo se puede calcular mediante la siguiente expresión.

$$g = D_p - l_1 - l_2 = g_s + g_e + e$$

Donde:

- $D_p$ : Duración de la fase (s)
- $l_1$ : tiempo de reacción = 2 (s)
- $l_2 = Y + R_c - e$  (s)
- $g_s$ : tiempo de servicio a la cola (s)
- $g_e$ : Duración del verde (s)
- $e$ : extensión del verde efectivo = 2 (s)

### **Paso 7. Determinación del ratio volumen-capacidad**

El ratio volumen capacidad es un concepto que se evalúa a nivel de grupo de carriles. Para ello, se ha de comenzar obteniendo la capacidad de dicho grupo, la cual se obtendrá mediante la siguiente expresión para aquellos casos en los que no se realizan giros a la izquierda como operación permitida.

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C}$$

Donde:

- $c$ : Capacidad del grupo (vehículos/h)
- $N$ : Número de carriles (carriles)
- $s$ : Flujo de ajustado de saturación (veh/h·carril)

- $g$ : Verde efectivo (s)
- $C$ : Duración del ciclo (s)

Esta ecuación no puede emplearse para calcular la capacidad de grupos de carriles compartidos o por grupos con giros a la izquierda permitidos, ya que éstos ven afectado el valor de su capacidad por otros factores. En caso de que encontráramos estos grupos en la intersección objeto de estudio, el procedimiento de cálculo a seguir sería el mostrado en el capítulo 31 de la HCM.

Así, una vez calculada la capacidad, el ratio volumen-capacidad se definirá mediante la siguiente ecuación.

$$X = \frac{v}{c}$$

Donde:

- $X$ : Ratio volumen capacidad
- $v$ : Demanda (veh/h)
- $c$ : Capacidad del grupo (veh/h)

Conocido el concepto de ratio volumen-capacidad, se ha de señalar que en el HCM se define un parámetro alternativo, conocido como ratio volumen-capacidad crítico, el cual es empleado cuando se desea evaluar el comportamiento de la intersección únicamente desde el enfoque de la relación entre la demanda de tráfico y la capacidad de ésta.

No obstante, y en pos de presentar el método de manera teórica de la forma más concisa posible, pero sin obviar ningún apartado importante, se tendrá en cuenta que en el presente TFM se evaluarán las intersecciones desde el punto de vista conjunto del ratio volumen-capacidad y los retrasos producidos, por lo que el arduo proceso de cálculo dicho parámetro no será expuesto.

### **Paso 8. Determinación de retrasos**

Los retrasos calculados en este paso representan el tiempo medio de demora que experimentan los vehículos que llegan a la intersección durante el periodo de análisis. Además, incluyen los retrasos producidos en los vehículos que permanecen en una cola

una vez que el periodo de análisis ha finalizado. Para calcularlos se emplea la siguiente expresión.

$$d = d_1 + d_2 + d_3$$

Donde:

- $d$ : Retraso (s/veh)
- $d_1$ : Retraso uniforme (s/veh)
- $d_2$ : Retraso incremental (s/veh)
- $d_3$ : Retraso por colas iniciales (s/veh)

## Conceptos

### Retraso uniforme

La siguiente ecuación representa una manera de calcular los retrasos cuando se asume que las llegadas a lo largo del ciclo son aleatorias. Para emplearla se ha de conocer la duración del periodo de verde efectivo durante el ciclo y el ratio de saturación o volumen-capacidad durante este periodo. En caso de que el estudio a realizar fuera un análisis de planificación, bastaría con asumir los valores calculados para los conceptos anteriores e introducirlos en la formula. Con ella se puede obtener el primer término de la ecuación anterior.

$$d_1 = \frac{0.5 \cdot C \cdot (1 - g/C)^2}{1 - [\min(1, X) \cdot g/C]}$$

Donde:

- $d_1$ : Retraso uniforme (s/veh)
- $C$ : Duración del ciclo (s)
- $g$ : Verde efectivo (s)
- $X$ : Ratio volumen capacidad

El procedimiento de cálculo del retraso empleado en el método es consistente con la ecuación anterior, sin embargo, se eliminan las hipótesis antes mencionadas para conseguir medidas más exactas del retraso uniforme para movimientos de tráfico con una buena progresión de señalización, movimientos con múltiples periodos verdes y

movimientos con múltiples flujos de saturación. Este nuevo proceso se denomina procedimiento incremental de acumulación de cola.

Este procedimiento modeliza las llegadas y las salidas como si ocurrieran durante el ciclo medio. Concretamente, considera que las llegadas y salidas ocurren durante uno o más periodos verdes efectivos. Los ratios de llegadas y salidas y los tamaños de colas resultantes pueden exponerse en un polígono de acumulación de colas, como el mostrado anteriormente en la ilustración 13. El procedimiento consiste en descomponer dicho polígono en trapecios y triángulos para llevar a cabo la estimación de los retrasos.

La clave para la construcción de un trapecio o un triángulo es que los ratios de llegadas y salidas deben ser constantes durante un determinado periodo de tiempo, sin embargo, pueden variar a lo largo del intervalo verde efectivo. Este proceso se ilustra en la ilustración 14 para un grupo de carriles con dos ratios diferentes de salidas durante verde efectivo.

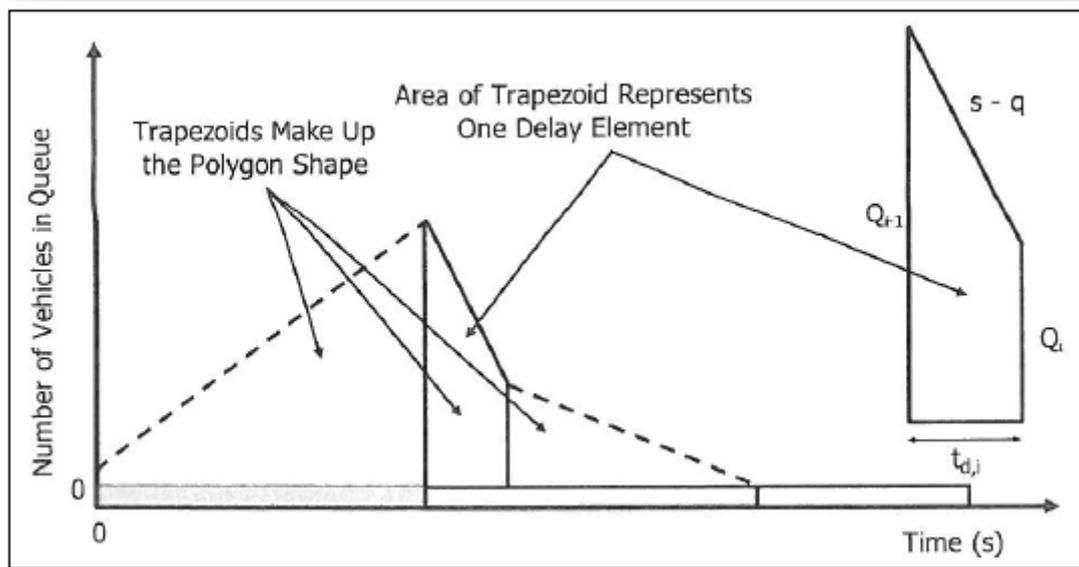


Ilustración 14. Polígono de acumulación de colas con dos ratios de salidas. Fuente: HCM 2010

El retraso asociado al ciclo se determina mediante la suma de las áreas de los trapecios y triángulos que componen el polígono. El área de estos trapecios o triángulos se determina mediante el conocimiento previo de las colas al comienzo del intervalo, sumándole las llegadas y restándole las salidas producidas durante ese intervalo. El resultado de estos

cálculos de campo es el número de vehículos en cola al final del intervalo, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q_i = Q_{i-1} \left( \frac{s}{3600} - \frac{q}{N} \right) \cdot t_{d,i} \geq 0$$

Donde:

- $Q_i$ : Vehículos en cola al final del intervalo  $i$  (veh)
- $s$ : Flujo de ajustado de saturación (veh/h·carril)
- $q$ : Tasa de llegadas  $=v/3600$  (veh/s)
- $N$ : número de carriles (carriles)
- $t_{d,i}$ : Duración del intervalo  $i$  durante el cual  $q$  y el  $s$  son constantes (s)

La construcción de los polígonos de acumulación de colas requiere la conversión de todos los ratios de flujo en unidades de vehículos por carril.

Así, una vez construido el polígono, se calcula el retraso total asociado a los triángulos y a los trapecios mediante la siguiente expresión:

$$d_{T,i} = 0,5 \cdot (Q_{i-1} + Q_i) \cdot t_{d,i}$$

Donde:

- $d_{T,i}$ : retraso total asociado al intervalo  $i$  (veh/s)
- $Q_i$  Vehículos en cola al final del intervalo  $i$  (veh)
- $t_{d,i}$ : Duración del intervalo  $i$  durante el cual  $q$  y el  $s$  son constantes (s)

El retraso total se calcula para todos los intervalos, se suma y se divide por el número de llegadas durante el ciclo ( $q \cdot C$ ) para estimar el retraso uniforme por vehículo.

La construcción del polígono de acumulación de colas requiere que el ratio de llegadas no exceda la capacidad de la fase. En caso de que esto ocurriera, se supondrá que es igual que la capacidad para la construcción del polígono.

La cola puede asumirse igual a cero al final de la fase protegida y la construcción del polígono comienza desde ese punto del ciclo. Una vez construido, se comprueba la hipótesis y, si la cola final no es cero, se construye un segundo polígono con el valor de la cola final obtenido como dato de partida.

Además, para construir el polígono se deben identificar puntos del ciclo en los cuales una de las dos siguientes condiciones se produzca:

- La tasa de salidas cambie, por ejemplo, debido al comienzo de un periodo de verde efectivo, un cambio en el flujo de saturación, etc.
- La tasa de llegadas cambie, por ejemplo, cuando cambian las condiciones de los grupos de llegada.

Durante los intervalos de tiempo que se encuentran entre estos puntos identificados, el flujo de saturación y el de llegadas permanecerán constantes.

### Retraso incremental

Este retraso se basa en dos componentes. Una de ellas tiene en cuenta el efecto de la aleatoriedad y las fluctuaciones producidas en la demanda en los diferentes ciclos que ocasionalmente pueden exceder a la capacidad. Este retraso se hace evidente en las colas que se pueden producir al final de la fase verde y que pueden provocar el fallo de la intersección en un ciclo.

La segunda componente es debida a una sobresaturación mantenida durante el periodo de análisis. Este tipo de retraso ocurre cuando las demandas agregadas durante el periodo de análisis superan a la capacidad agregada de la intersección. A veces se le llama componente determinista del retraso,  $d_{2,d}$  y se muestra en la ilustración 15.

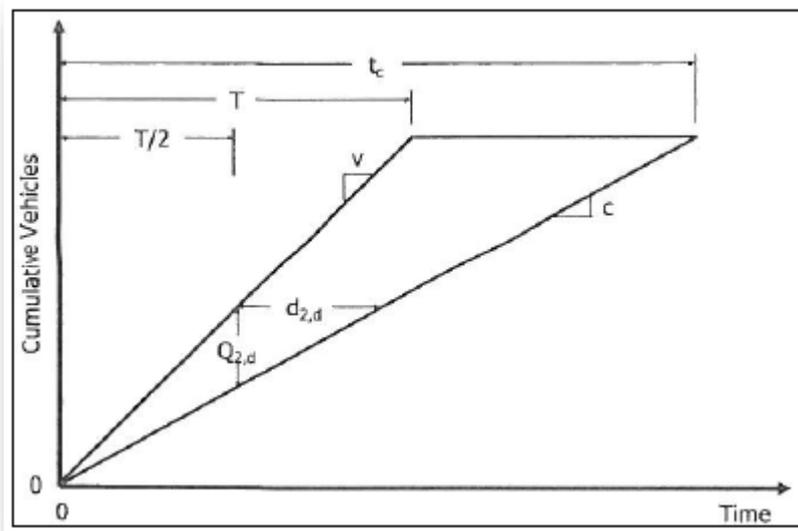


Ilustración 15. Llegadas y salidas acumuladas en periodo sobrecargado. Fuente: HCM 2010

La ilustración 15 muestra el crecimiento de las colas que se producen en una intersección con una capacidad  $c$ , a la que llegan vehículos con un flujo de demanda  $v$  mayor que  $c$ , durante un periodo de tiempo  $T$ . La componente determinista del retraso  $d_{2,d}$  representa el retraso medio sufrido por los vehículos. El último vehículo en llegar a la intersección durante el periodo de análisis no abandonará la cola hasta que hayan pasado  $t_c$  horas. El tamaño medio de la cola asociado a este retraso será el representado por  $Q_{2,d}$ , presentándose una cola residual al final del periodo de tamaño  $T \cdot (v - c)$ .

#### Retraso por cola inicial

La ecuación empleada para el cálculo del retraso incremental se basa en la hipótesis de que no existen colas iniciales al comienzo del periodo de análisis. Así, el término del retraso por cola inicial tiene en cuenta el retraso adicional que sufren los vehículos por los atascos registrados al comienzo de cada fase. Estas colas son resultado de una demanda insatisfecha en el periodo anterior, por tanto, no incluye en la cola los vehículos que se encuentran en ella por aleatoriedad o por fluctuaciones de la demanda entre ciclos que puedan exceder la capacidad.

Así, para aquellos análisis que incluyan más de un periodo, las colas iniciales serán las residuales de los periodos anteriores al que se esté estudiando en cada momento.

En la figura 13 se muestra el retraso debido a las colas iniciales, correspondiente al trapecioide encerrado entre líneas finas. El retraso medio por vehículo vendrá representado por  $d_3$ . El tamaño la cola inicial será de  $Q_b$  vehículos y la duración en la que la cola inicial influirá en la intersección se representa mediante la variable  $t$ . En la ilustración 16, esta duración será igual al periodo de análisis, aunque podría ser inferior con una menor demanda.

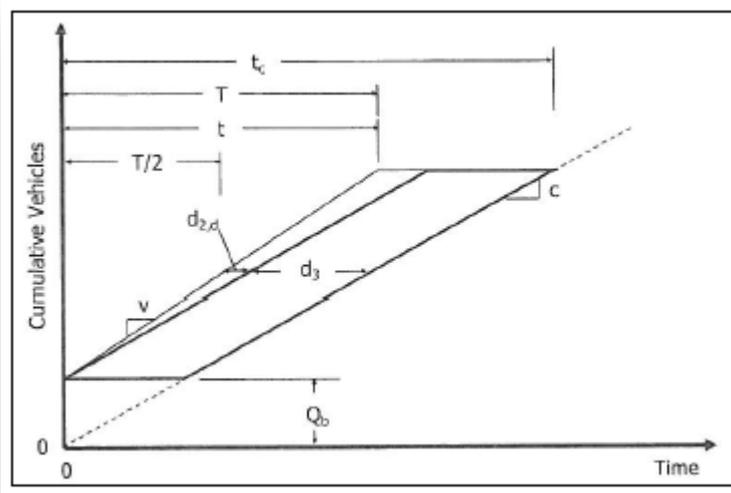


Ilustración 16. Cola inicial con demanda mayor que capacidad. Fuente: HCM 2010

Como se puede observar, en la ilustración 16 se muestra el efecto de la cola inicial en un caso en el que el flujo de demanda  $v$  es mayor que la capacidad  $c$  durante todo el periodo de análisis. Sin embargo, podría ocurrir que el volumen fuera inferior a la capacidad, y por tanto el tamaño de cola fuera disminuyendo o incluso desapareciera en cada ciclo, tal y como se muestra en las dos siguientes ilustraciones 17 y 18.

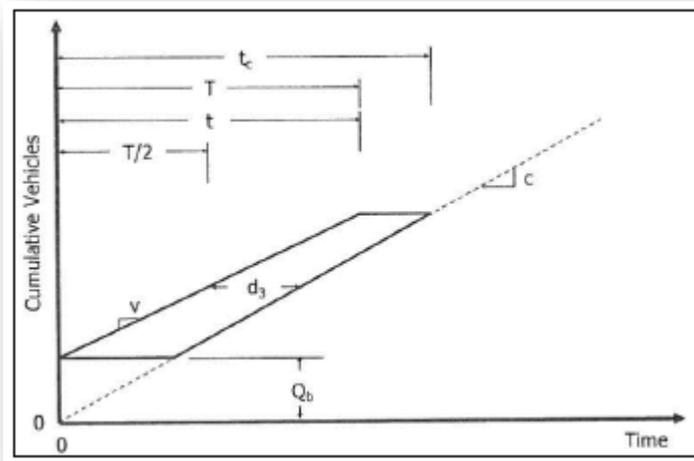


Ilustración 17. Cola inicial con demanda menor que capacidad. Fuente: HCM 2010

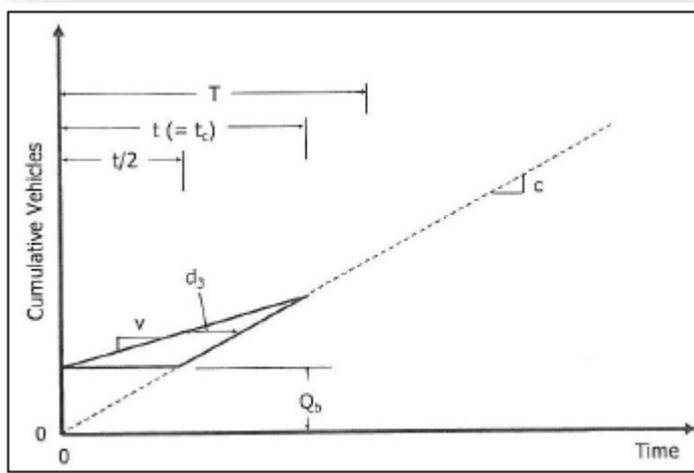


Ilustración 18. Cola inicial con eliminación de cola en el ciclo. Fuente: HCM 2010

Como ya se ha comentado, siempre que se hace referencia a la cola inicial, se habla de atascos provocados por demandas insatisfechas en periodos de análisis anteriores, no a las producidas por las llegadas aleatorias o variaciones de demanda entre ciclos.

Una vez aclarados los conceptos, se describe el procedimiento para llevar a cabo el cálculo de los retrasos producidos para un determinado grupo de carriles en un periodo de análisis dado.

#### A. Cálculo del retraso uniforme básico

La ilustración 13 mostraba un polígono de retrasos para un caso simple, pero lo habitual es encontrar casos de mayor dificultad, que definan polígonos como el que se puede observar en la siguiente ilustración 19.

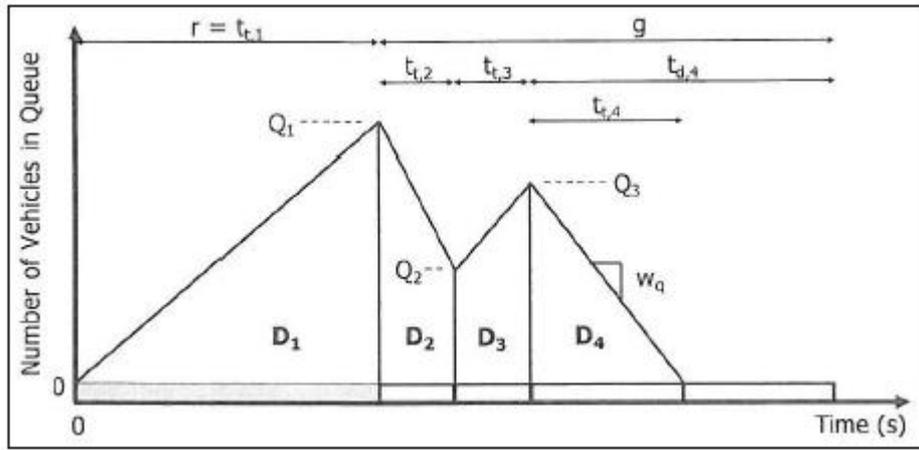


Ilustración 19. Polígono de cálculo de retraso uniforme. Fuente: HCM 2010

En este caso particular, el polígono de la ilustración 19 describe una operación con el giro a la izquierda permitido desde un carril compartido.

El área encerrada por el polígono representa el retraso total producido durante el ciclo medio. Si este retraso se divide por el número de llegadas por ciclo, se obtiene una estimación del retraso uniforme. Las ecuaciones empleadas son las siguientes.

$$d_{1b} = \frac{0,5 \cdot \sum_{i=1} (Q_{i-1} + Q_i) \cdot t_{t,i}}{q \cdot C}$$

Con

$$t_{t,i} = \min(t_{d,i}, Q_{i-1}/w_q)$$

Donde:

- $d_{1b}$ : Retraso uniforme básico (s/veh)
- $t_{t,i}$ : Duración del triángulo o el trapecio en el intervalo i (s)
- $w_q$ : Tasa de cambio de la cola (veh/s)

- $Q_i$ : Vehículos en cola al final del intervalo  $i$  (veh)
- $q$ : Tasa de llegadas  $=v/3600$  (veh/s)
- $C$ : Duración del ciclo (s)

El sumatorio incluye todos los intervalos para los cuales la cola no es nula. En general,  $t_{t,i}$  tiene la misma duración que su intervalo correspondiente, sin embargo, durante algunos intervalos, la cola se disipará y el valor de  $t_{t,i}$  será el necesario para esa eliminación. Se puede calcular dividiendo la cola inicial del intervalo anterior entre la tasa de cambio de la cola, tal y como se muestra en la segunda ecuación de las dos anteriormente expuestas. En el caso de la ilustración 19, esta situación se produce en el cuarto intervalo de tiempo, pues podemos observar que el número de vehículos en la cola será cero antes de que se acabe el ciclo.

El retraso calculado en este punto será el denominado retraso uniforme básico. Éste podrá ser ajustado en el paso C en caso de que existan colas iniciales que se disipen durante el periodo de análisis. No obstante, el retraso uniforme empleado en la ecuación del cálculo de los retrasos totales se calculará según los siguientes apartados.

### **B. Análisis de colas iniciales**

Si para algún grupo de carriles se presentan colas iniciales, es necesario construir un segundo grupo de polígonos para cada grupo de carril que complete a los construidos en el paso A.

Para comenzar, se deben transformar las colas iniciales conocidas para cada grupo de movimiento en colas iniciales para cada grupo de carriles. Cuando la relación entre grupos de carriles y de movimientos sea de uno a uno, esta transformación no será necesaria. Sin embargo, cuando haya carriles compartidos por diferentes movimientos o carriles adicionales de paso, habrá que realizar la citada transformación. Concretamente, la cola inicial para cada grupo de carriles se estimará como igual a la cola inicial conocida por el número de carriles en el grupo de carril dividida por el número total de carriles compartidos y de paso.

Cuando se hayan construido los polígonos en este paso, los grupos de carriles en los que se hayan registrado colas iniciales tendrán su ratio de llegadas ajustado a la capacidad del grupo, independientemente de su tasa de llegada inicial. El resto de grupos de carriles

tendrán su tasa de llegadas ajustada para ser igual que el menor valor entre la demanda y la capacidad.

### C. Cálculo del retraso uniforme

Si ningún grupo de carriles tiene colas iniciales, el retraso uniforme será igual al calculado en el paso A. Sin embargo, si encontramos algún grupo de carriles en la intersección con presencia de colas al inicio de la fase, se deben emplear las siguientes ecuaciones para calcular los retrasos uniformes de todos los grupos.

Si el grupo  $i$  tiene cola inicial:

$$d_{1,i} = d_{s,i} \cdot \frac{t_i}{T} + d_{1b,i} \cdot \frac{(T - t_i)}{T}$$

Si el grupo  $i$  no tiene cola inicial:

$$d_{1,i} = d_{s,i} \cdot \frac{t_a}{T} + d_{1b,i} \cdot \frac{(T - t_a)}{T}$$

Donde:

- $d_s$ : Retraso uniforme por saturación (s/veh)
- $t_i$ : Duración de la demanda insatisfecha para el grupo  $i$  (h)
- $t_a$ : Duración media de la demanda insatisfecha (h)
- $d_{1b}$ : Retraso uniforme básico (s/veh)
- $T$ : Duración del periodo de análisis (h)

### D. Cálculo de la capacidad media

Al igual que en el caso anterior, si ningún grupo de carriles presenta atascos iniciales, la capacidad media será igual a la calculada en el paso 7. Sin embargo, si encontramos alguna cola inicial en la intersección, se emplearán las siguientes ecuaciones para llevar a cabo el cálculo.

Si el grupo  $i$  tiene cola inicial:

$$C_{A,i} = c_{s,i} \cdot \frac{t_i}{T} + c_i \cdot \frac{(T - t_i)}{T}$$

Si el grupo  $i$  no tiene cola inicial:

$$C_{A,i} = c_{s,i} \cdot \frac{t_a}{T} + c_i \cdot \frac{(T - t_a)}{T}$$

Donde:

- $C_A$ : Capacidad media (veh/h)
- $t_i$ : Duración de la demanda insatisfecha para el grupo  $i$  (h)
- $t_a$ : Duración media de la demanda insatisfecha (h)
- $c_s$ : Capacidad de saturación (veh/h)
- $c_i$ : Capacidad del grupo  $i$  (veh/h)
- $T$ : Duración del periodo de análisis (h)

### E. Cálculo del retraso por cola inicial

Si ninguno de los grupos de carriles tiene colas iniciales, el retraso debido a este hecho será 0. Sin embargo, en caso de presentarse para algún grupo de carriles de la intersección, se emplearán las siguientes ecuaciones para calcularlo para cada uno de los grupos.

$$d_3 = \frac{3600}{v \cdot T} \left( t_A \cdot \frac{Q_b + Q_c - Q_{co}}{2} + \frac{Q_c^2 - Q_{co}^2}{2c_A} - \frac{Q_b^2}{2c_A} \right)$$

Con

$$Q_c = Q_b + t_A \cdot (v - c_A)$$

Si  $v \geq c_A$ , tendremos

$$Q_{co} = T \cdot (v - c_A)$$

$$T = t_A$$

Si  $v \leq c_A$ , tendremos

$$Q_{co} = 0 \text{ veh\u00edculos}$$

$$t_A = \frac{Q_b}{(c_A - v)} \leq T$$

Donde:

- $t_A$ : duración ajustada de la demanda insatisfecha (h)
- $Q_c$ : cola al final del periodo de análisis (veh)
- $Q_{co}$ : cola al final del periodo de análisis cuando  $v \geq c_A$  y  $Q_b = 0$  (veh)

El último vehículo en llegar a una cola saturada durante el periodo de análisis la abandonará en el tiempo obtenido mediante la siguiente expresión:

$$t_c = t_A + \frac{Q_c}{c_A}$$

Donde:

- $t_c$ : Tiempo de la cola para deshacerse
- $t_A$ : Duración ajustada de la demanda insatisfecha (h)
- $Q_c$ : Cola al final del periodo de análisis (veh)
- $C_A$ : Capacidad media (veh/h)

Este valor de  $t_c$  es medido desde el inicio del periodo de análisis hasta el momento en el que el último vehículo en llegar a la cola abandona la intersección.

#### F. Factor de cálculo del retraso incremental

La ecuación para el cálculo del retraso incremental incluye un valor que considera el efecto del tipo de controlador sobre el retraso. Esta variable recibe el nombre de factor de retraso incremental  $k$ . Su valor varía entre 0.04 y 0.50, siendo 0.50 el valor recomendado para fases preprogramadas con tiempos fijos como las que se observan en los casos prácticos analizados en el capítulo posterior.

Aunque no se aplicará en el presente TFM, se ha de conocer que en fases que actúen bajo controladores accionados por el tráfico la influencia de la señalización a través de detectores sobre los retrasos se tendrá en cuenta mediante el factor  $k$ , haciendo uso de las siguientes ecuaciones.

$$k = (1 - 2k_{min}) \cdot \left( \frac{v}{c_a - 0,5} \right) + k_{min} \leq 0.5$$

Con

$$k_{min} = -0.375 + 0.354 \cdot PT - 0.0910 \cdot PT^2 + 0.00889 \cdot PT^3 \geq 0.04$$

$$c_a = 3600 \cdot \frac{g_a \cdot s \cdot N}{C}$$

$$g_a = G_{max} + Y + R_c - l_1 - l_2$$

Donde:

- $k$ : factor de retraso incremental
- $c_a$ : capacidad disponible para el grupo de carriles en la fase activada
- $k_{min}$ : factor incremental mínimo
- $g_a$ : verde efectivo disponible (s)

Como se puede observar en las ecuaciones anteriores, el valor del factor depende del tiempo verde efectivo seleccionado y del tiempo de paso para el controlador del grupo de carriles que se esté estudiando. Algunas investigaciones indican que menores tiempos de paso dan como resultado valores de  $k$  inferiores, y por tanto menores retrasos, siempre y cuando el tiempo de paso sea suficiente como para servir a la cola.

### G. Cálculo del retraso incremental

El término correspondiente al retraso incremental tiene en cuenta el retraso producido por la aleatoriedad del número de vehículos que llegan a la intersección en cada ciclo. Además, incluye el efecto de las demandas que excedan la capacidad producidas durante el periodo de análisis. Se debe tener en cuenta que la expresión empleada para el cálculo del retraso incremental asume que no hay colas iniciales debidas a demandas insatisfechas en el periodo previo de análisis.

$$d_2 = 900 \cdot T \left[ (X_A - 1) + \sqrt{(X_A - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X_A}{c_A \cdot T}} \right]$$

Con

$$X_A = \frac{v}{c_A}$$

Donde:

- $X_A$ : ratio volumen-capacidad medio
- $I$ : Factor de influencia de señalización anterior

## H. Cálculo del retraso del grupo de carriles

Los términos del retraso uniforme, el retraso incremental y el retraso debido a las colas iniciales calculados en los pasos anteriores se suman para obtener el retraso total, tal y como se adelantaba en la ecuación inicial del paso 8.

## I. Cálculo de las estimaciones agregadas de retraso

Normalmente es deseable calcular un valor medio de los retrasos para los accesos a la intersección. Para ello, se ponderan los retrasos de cada uno de los grupos de carriles de los accesos mediante su ratio de demanda. Así, se emplea la siguiente ecuación.

$$d_{A,j} = \frac{\sum_{i=1}^{m_j} d_i v_i}{\sum_{i=1}^{m_j} v_i}$$

Donde:

- $d_{A,j}$ : retraso para el acceso j (s/veh)
- $d_i$ : retraso para el grupo de carril i (s/veh)
- $m_j$ : número de carriles para el acceso j

Del mismo modo se actúa con los valores de los retrasos para los accesos, con el fin de calcular los retrasos de la intersección al completo.

$$d_I = \frac{\sum d_i v_i}{\sum v_i}$$

Donde:

- $d_I$ : retraso producido en la intersección (s/veh)

## Paso 9. Determinación del nivel de servicio

Conocido el valor de los retrasos, se puede emplear la tabla 8 para determinar el nivel de servicio para cada uno de los grupos de carril, para cada acceso y para la intersección al completo.

Tabla 8. Niveles de servicio. Automóviles. Fuente: HCM 2010

Retraso (s/veh)	Nivel de servicio en función del ratio Volumen - Capacidad	
	≤ 1.0	> 1.0
≤ 10	A	F
> 10 – 20	B	F
> 20 – 35	C	F
> 35 – 55	D	F
> 55 – 80	E	F
> 80	F	F

### Paso 10. Determinación del ratio de almacenamiento en colas

En el capítulo 31 del HCM se describe un procedimiento para estimar el tamaño de la cola y el ratio de almacenamiento en colas. El tamaño de la cola indica en realidad la posición del vehículo parado que se encuentra más alejado de la línea de detención durante el ciclo como consecuencia de la señalización roja. Ésta dependerá del patrón de llegadas de los vehículos y del número de vehículos que no abandonen la intersección en el ciclo anterior.

Por otro lado, el ratio de almacenamiento de la cola representa la proporción de la zona de almacenamiento de vehículos disponible que es ocupada en el momento en el que se alcanza el tamaño de la cola. Si este ratio es superior a 1, significará que el espacio de almacenamiento de las colas está desbordado y habrá vehículos en cola que podrían bloquear el avance de otros.

Este parámetro no afecta al nivel de servicio de manera directa, por lo que su cálculo puede ser omitido a la hora de realizar un análisis del funcionamiento de la intersección.

#### 3.2.2.2. Extensión a múltiples periodos

La secuencia de los 10 pasos mostrados puede extenderse para llevar a cabo el estudio de una secuencia de periodos análisis consecutivos, cada uno con una duración  $T$  y con un volumen de demanda conocido. Así, el análisis se desarrolla para cada periodo siguiendo el orden en el que han ocurrido.

Normalmente, un análisis de múltiples periodos suele comenzar con un periodo no sobresaturado y, a ser posible, sin colas iniciales para ningún movimiento.

### **3.2.2.3. Interpretación de resultados**

Los cálculos reflejados en los pasos anteriores tienen como resultado la estimación de los retrasos y del nivel de servicio para cada grupo de carriles para cada acceso a la intersección y para la intersección al completo. Además, la obtención del ratio volumen-capacidad para cada grupo de carriles y la posibilidad de calcular el ratio volumen-capacidad crítico de la intersección proporcionan algunas interpretaciones muy útiles a la hora de evaluar el funcionamiento.

#### **Nivel de servicio**

En general, el nivel de servicio da una medida genérica de la aceptabilidad de los retrasos por parte de los conductores. Por tanto, dependerá de la zona en la que se sitúe la intersección, pues un retraso aceptable en una gran ciudad podría ser impensable para los habitantes de zonas rurales.

El nivel de servicio ha de ser interpretado con precaución, pues puede sugerir la calificación de un servicio de una intersección como aceptable cuando en realidad algunos grupos de carriles con poco tráfico estén operando en un nivel de servicio inaceptable, pero que queda enmascarado en el global de la intersección. Por ello, el analista debería comprobar siempre que cada grupo de carril realiza un servicio en condiciones aceptables y considerar el peor nivel de servicio de la intersección a la hora de interpretar el resultado.

#### **Ratio volumen-capacidad**

Por norma general, un valor del ratio volumen-capacidad superior a 1 es indicativo de un fallo actual o futuro. En estos casos es aconsejable realizar un análisis de varios periodos, el cual debería abarcar aquellos en los que se presente una cola residual.

Por su parte, el ratio volumen-capacidad crítico de la intersección se emplea para evaluar la intersección únicamente desde el punto de vista de la capacidad. Es posible tener un ratio crítico menor que 1 y sin embargo, tener movimientos sobresaturados dentro del ciclo de señalización. Si esto ocurriera significaría que la duración del ciclo no se encuentra apropiadamente dividida en sus fases. Por tanto, debería considerarse una reasignación de los tiempos del ciclo, donde se diera un tiempo adicional a aquellas fases con grupos de carriles que tengan una relación volumen-capacidad superior a 1.

Con los controladores totalmente accionados se pretende asignar los tiempos al ciclo de señalización de manera dinámica, en base a la demanda, y, por tanto, manteniendo una operación eficiente en todos los ciclos. Para medir dicha eficiencia se puede emplear el ratio volumen-capacidad crítico de la intersección, teniendo en cuenta que en la mayoría de las intersecciones con controladores mediante detectores de tráfico su valor oscilará entre 0.85 y 0.95. Así, los valores cercanos a 0.85 se presentarán en aquellas intersecciones con múltiples detectores en los carriles destinados al tráfico de paso. Por su parte, un ratio menor de 0.85 puede ser indicación de que el intervalo de señalización verde es excesivo, por lo que el analista podría considerar la reducción del tiempo de paso, del verde mínimo, o bien de ambos parámetros. Por otro lado, un valor superior a 0.95 representará que gran parte de las fases acaban con el máximo verde y que el controlador no será capaz de reasignar las duraciones de los ciclos en función de la demanda. Aumentando el valor del tiempo verde máximo se puede mejorar la operación, sin embargo, también puede perjudicar a la operación cuando las demandas de cada fase varíen ampliamente.

Para intersecciones con control semiaccionado o coordinado-accionado, el ratio volumen-capacidad crítico puede variar mucho por la naturaleza no accionada de algunas fases. Esto ocurre porque la duración de dichas fases no está relacionada directamente con su demanda.

Por último, conviene indicar que el ratio volumen-capacidad crítico de una intersección puede ser engañoso cuando se emplea para evaluar la suficiencia de la geometría de la intersección, como se suele requerir en ciertas aplicaciones de planificación. El problema estriba en que flujos de tráfico pequeños indican la necesidad de ciclos cortos para minimizar los retrasos. Por tanto, un valor de  $X_c$  relativamente grande no es indicativo de una mala calidad en la operación, sino que más bien indica que hay que prestar mucha atención a que la duración de las fases y el tamaño de las colas sea el adecuado, especialmente para las fases críticas.

### **Combinaciones de ratio volumen-capacidad y retrasos**

En algunos casos, los retrasos son mayores cuando los ratios volumen-capacidad son menores. En estas situaciones, una mala progresión, una duración del ciclo excesivamente elevada o una planificación de fases ineficiente suelen ser las causas. Cuando la

intersección sea parte de un sistema de intersecciones cuya señalización se encuentre coordinada, la duración del ciclo se determina por consideraciones del sistema de coordinación, y las alteraciones o variaciones de características concretas en ciertas intersecciones no suelen ser prácticas.

Por otro lado, es posible que los retrasos se encuentren dentro de límites aceptables, aunque el ratio volumen-capacidad sea elevado. Esto puede ocurrir cuando se presenta alguna combinación de las siguientes condiciones: la longitud del ciclo es corta, el periodo de análisis es corto, la capacidad del grupo de carriles es elevada o no hay colas iniciales. Si en este escenario se crea una cola residual, se hace necesario el estudio del comportamiento de múltiples periodos para tener una verdadera medida de los retrasos.

En caso de que ni los retrasos ni el ratio volumen-capacidad sean aceptables por ser muy altos, nos encontramos ante una situación crítica. En estas situaciones, el retraso se puede incrementar de manera apreciable con pequeños aumentos de la demanda. La única posibilidad de mejoras pasa por cambiar el diseño de la señalización o la geometría de la intersección.

En resumen, pueden existir retrasos inaceptables tanto para demandas problemáticas como para demandas que puedan ser absorbidas por la capacidad. Es más, niveles de retraso aceptables no aseguran que la capacidad sea suficiente. Retrasos y capacidad son variables complejas que se encuentra influenciadas por un amplio rango de condiciones del tráfico, de la carretera y de la señalización. El método presentado aquí puede emplearse para estimar las medidas del funcionamiento, identificar problemas y ayudar en la búsqueda y desarrollo de mejoras.

### **3.3. ANYLOGIC**

#### **3.3.1. Historia de AnyLogic**

A principios de la década de los 90 hubo un gran interés en el enfoque matemático de los procesos paralelos de modelado y simulación. Este enfoque puede ser aplicado al análisis de la corrección de programas paralelos y distribuidos. El grupo, Red Distribuido (Distributed Computer Network, DCN) de la Universidad Técnica de San Petersburgo desarrolla este tipo de sistema de software para el análisis del programa de corrección. Esta nueva herramienta se llamó COVERS (concurrente de verificación y de simulación).

Este sistema permitía la notación de modelado gráfico de la estructura del sistema y el comportamiento. El instrumento fue elaborado utilizando una beca de investigación por Hewlett Packard. En 1998 el éxito de esta investigación inspiró al laboratorio DCN para organizar una empresa con la misión de desarrollar un nuevo software de simulación para la edad moderna. El énfasis en el desarrollo se incluyó en los métodos aplicados: simulación, análisis de rendimiento, el comportamiento de los sistemas estocásticos, optimización y visualización. El nuevo software lanzado en 2000 se basó en las ventajas de las más recientes tecnologías de la información: un enfoque orientado a objetos, los elementos del estándar UML, el lenguaje Java, una moderna interfaz gráfica, etc.

La herramienta fue nombrada AnyLogic, ya que apoya todos los tres conocidos enfoques de modelado:

- Dinámica de sistemas
- Sistemas de eventos discretos
- Simulación basada en agentes

Se puede utilizar cualquier combinación de estos enfoques en un único modelo. La primera versión de AnyLogic fue AnyLogic 4, debido a que la numeración sigue la numeración de COVERS 3.0.

Se hizo gran paso en 2003, cuando AnyLogic 5 fue introducido.

AnyLogic se enfoca en modelado de negocios en los siguientes ámbitos de aplicación:

- Mercado y competencia
- Sanidad pública
- Fabricación
- Cadenas de producción y distribución
- Logística
- Venta al por menor
- Procesos del negocio
- Dinámica de ecosistemas y sistemas sociales
- Defensa
- Gestión de proyectos y activos
- Infraestructura de TI

- Dinámica de peatones y Simulación del tráfico
- Industria aeroespacial
- Industria fotovoltaica

La última versión principal, AnyLogic 7, fue introducido en 2014. La plataforma para el entorno de desarrollo del modelo AnyLogic 7 es Eclipse. AnyLogic 7 es una plataforma de software cruzada ya que trabaja con Windows, Mac OS y Linux.

### **3.3.2. Enfoques de modelado de AnyLogic**

#### **3.3.2.1. Modelado de eventos discretos**

La mayoría de los procesos comerciales se pueden describir como una secuencia de eventos separados y discretos. Por ejemplo, un camión llega a un almacén, va a una puerta de descarga, se descarga y luego se marcha. Para simular esto, a menudo se elige la simulación de eventos discretos.

Utilizando modelos de simulación de eventos discretos, el movimiento de un tren desde el punto A al punto B se modela con dos eventos, a saber, una salida y una llegada. El movimiento real del tren se modelaría como un retraso entre los eventos de salida y llegada. Estos eventos y movimientos entre ellos se pueden animar suavemente.

La simulación de eventos discretos se enfoca en los procesos en un sistema en un nivel medio de abstracción. Normalmente, los detalles físicos específicos, como la geometría del automóvil o la aceleración del tren, no están representados. El modelado de simulación de eventos discretos es ampliamente utilizado en los campos de fabricación, logística y salud.

Cuando el sistema bajo análisis se puede describir naturalmente como una secuencia de operaciones, se deben usar técnicas discretas de modelado de eventos. Sin embargo, no siempre está claro cuál de los tres paradigmas de modelado es mejor para un sistema. Por ejemplo, si es más fácil describir el comportamiento de cada objeto individual que tratar de crear un flujo de trabajo global, el modelado basado en agentes puede ser la solución. De forma similar, si está interesado en los valores agregados, y no en la interacción de unidades individuales, se puede aplicar la dinámica del sistema. AnyLogic admite e integra los tres métodos de modelado, por lo que puede experimentar con los niveles de

abstracción y los enfoques de modelado de simulación sin necesidad de múltiples herramientas.

En las herramientas clásicas de eventos discretos, las entidades son pasivas y solo pueden tener atributos que afectan la forma en que se manejan. En el software de simulación multimétodo AnyLogic, las entidades y recursos se pueden modelar como agentes con comportamiento individual y cambios de estado. Por ejemplo, en un modelo de fabricación, una grúa se puede modelar como un recurso en un diagrama de flujo de proceso, pero al mismo tiempo puede tener cambios de estado en el interior, incluso inactivo, moviéndose, girando, cargando, etc. Con el modelado multimétodo, los modelos correctos pueden construirse sin soluciones provisionales.

### **3.3.2.2. Modelado de dinámica de sistemas**

La dinámica del sistema es un método de modelado altamente abstracto. Ignora los detalles finos de un sistema, como las propiedades individuales de personas, productos o eventos, y produce una representación general de un sistema complejo. Estos modelos de simulación abstracta pueden usarse para modelos y simulaciones estratégicas a largo plazo. Por ejemplo, una red telefónica que planifica una campaña de marketing puede simular y analizar el éxito de las nuevas ideas del plan de datos sin tener que modelar las interacciones individuales del cliente.

Las relaciones complejas se encuentran en todas las áreas de negocios, estudio y esfuerzo. Comprender esto con la dinámica del sistema ha demostrado ser muy efectivo. El efecto del cambio puede ser entendido y las posibilidades cuantitativamente probadas y analizadas.

En los negocios, hay muchas dependencias, por ejemplo, la moral de los empleados que afecta la productividad o el efecto de la publicidad en la percepción de la marca. Hay causa y efecto, y a menudo hay un retraso de tiempo que solo es visible después de una observación prolongada. Aquí es donde las herramientas de modelado de dinámica de sistemas dan una ventaja.



Ilustración 20. Dinámica del sistema: comercialización y cuota de mercado. Fuente: [www.Anylogic.com](http://www.Anylogic.com)

Las dependencias, como la publicidad y la percepción de marca, a menudo se representan como bucles llamados ciclos de retroalimentación. Por ejemplo, cuanto más dinero inviertes en marketing, mayores son los ingresos que tienes, y por lo tanto, más dinero puedes gastar en marketing. El ciclo de retroalimentación es un concepto básico de la dinámica del sistema.



Ilustración 21 Ejemplos de retroalimentación y dinámica del sistema. Fuente: [www.Anylogic.com](http://www.Anylogic.com)

La descripción de los bucles de retroalimentación y el modelado del mundo real en la dinámica del sistema se realiza utilizando stocks (por ejemplo, material, conocimiento, personas, dinero), flujos entre stocks e información para determinar los flujos. La dinámica del sistema no considera eventos únicos y toma una vista agregada, centrándose en las políticas.

Al modelar con dinámica de sistema:

- Modelos con agregados, y no objetos individuales.
- Use dependencias globales y proporcione datos cuantitativos para ellas.

Las dependencias no son lineales en el mundo real y deben modelarse con el software de simulación de dinámica de sistemas, que es mucho más poderoso que las hojas de cálculo. Matemáticamente, un modelo de simulación de dinámica de sistemas se asigna a un sistema de ecuaciones diferenciales que se resuelven numéricamente en un motor de simulación.

AnyLogic admite el diseño y la simulación de estructuras de retroalimentación tales como diagramas de stock y flujo, variables de matriz (subíndices) de una manera que la mayoría de los modeladores de dinámica de sistemas conocen.

AnyLogic ofrece intrínsecamente todos los beneficios del enfoque orientado a objetos para el modelado de dinámica de sistemas. Los modelos complejos se pueden definir de forma jerárquica con objetos que solo exponen variables de interfaz como entradas y salidas.

Además, un patrón de dinámica de sistema frecuentemente encontrado se puede guardar como un objeto de biblioteca y reutilizarlo dentro de un modelo de simulación o en diferentes modelos.

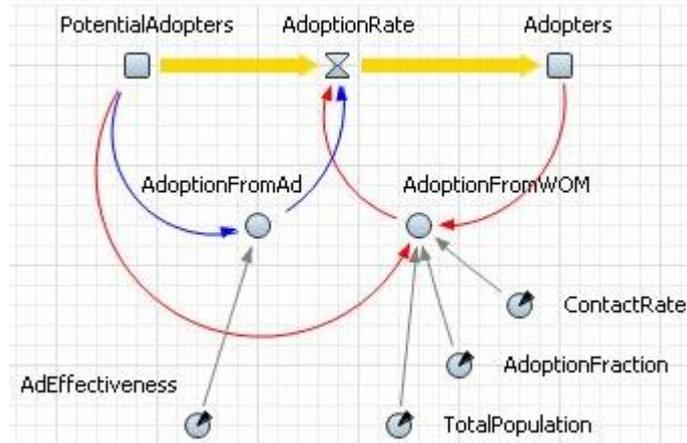


Ilustración 22. Modelo de simulación de dinámica de sistemas. Fuente: [www.Anylogic.com](http://www.Anylogic.com).

AnyLogic es la única herramienta que permite la combinación de componentes del modelo de dinámica del sistema con los desarrollados utilizando los métodos de eventos discretos y basados en agentes. Esto se puede hacer de diferentes maneras. Por ejemplo, el mercado de consumo se puede modelar utilizando la dinámica del sistema y la cadena de suministro con el enfoque basado en agentes. Combinarlos para que el mercado de consumo impulse la cadena de suministro.

En otro ejemplo, la población de una ciudad puede ser modelada como agentes individuales, y la infraestructura subyacente económica o de fondo en la dinámica del sistema.

### 3.3.2.3. Modelado basado en agentes

El modelado basado en agentes se centra en los componentes activos individuales de un sistema. Esto está en contraste tanto con el enfoque de dinámica de sistema más abstracto, como con el método de evento discreto centrado en el proceso.

Con el modelado basado en agentes, las entidades activas, conocidas como agentes, deben identificarse y definirse su comportamiento. Pueden ser personas, hogares, vehículos, equipos, productos o empresas, lo que sea relevante para el sistema. Se establecen las conexiones entre ellos, se establecen las variables del entorno y se ejecutan las simulaciones. La dinámica global del sistema luego emerge de las interacciones de los muchos comportamientos individuales.

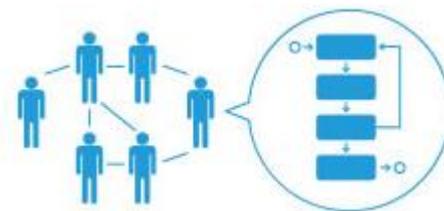
Los enfoques de modelado tradicionales tratan a los empleados, clientes, productos, instalaciones y equipos de la compañía como grupos uniformes, entidades pasivas o solo recursos en un proceso.

Los modelos de dinámica de sistemas, por ejemplo, necesariamente contienen suposiciones tales como, "Tenemos 120 empleados en I + D, y pueden diseñar unos 20 productos nuevos al año" o, "Tenemos una flota de 1200 camiones con una capacidad de envío mensual definida, y el 5% de ellos deben ser reemplazados cada año".

Mientras tanto, los modelos discretos de eventos ven a las organizaciones como una serie de procesos, tales como: "Un cliente llama a un centro de llamadas; la llamada primero es manejada por un operador Tipo A, que toma un promedio de 2 minutos, luego el 20% necesita para ser enviado".

Estos enfoques son más poderosos que los modelos basados en hojas de cálculo. Pueden capturar la dinámica organizacional y la no linealidad, pero ignoran la composición única y las relaciones complejas de entidades individuales. Por ejemplo, un cliente puede consultar a su familia antes de tomar una decisión de compra, o la disponibilidad individual de la aeronave puede determinarse mediante cronogramas rígidos de mantenimiento de la flota.

El enfoque de modelado basado en agentes está libre de estas limitaciones porque el foco está directamente en los objetos individuales, su comportamiento y su interacción. Como tal, un modelo de simulación basado en un agente es un conjunto de objetos interactivos que reflejan las relaciones en el mundo real. Los resultados hacen que la simulación basada en agentes sea un paso natural para comprender y gestionar la complejidad de los sistemas empresariales y sociales de hoy en día.



*Ilustración 23. Modelado de simulación basado en agentes. Fuente: [www.Anylogic.com](http://www.Anylogic.com).*

Las empresas y las organizaciones gubernamentales de hoy en día han acumulado grandes cantidades de datos en sus CRM, ERP, recursos humanos y otras bases de datos. El modelado basado en agentes es una forma poderosa de poner esos datos a trabajar. Un modelo de simulación basado en agentes con individuos puede usar propiedades y comportamientos reales, personalizados, tomados directamente de estas bases de datos. Los resultados ofrecen una optimización refinada al proporcionar una forma precisa, fácil y actualizada para modelar, pronosticar y comparar escenarios.

#### **3.3.2.4. Modelado de simulación multimétodo**

La idea del modelado multimétodo es simple: integrar a la perfección diferentes métodos de modelado y simulación para superar los inconvenientes de los enfoques individuales y aprovechar al máximo cada uno. La combinación de diferentes métodos conduce a modelos eficientes y manejables sin usar soluciones temporales.

Existen tres metodologías principales utilizadas para crear modelos dinámicos de simulación empresarial: dinámica de sistemas, modelado discreto de eventos y modelado basado en agentes.

El método de dinámica del sistema asume un alto nivel de abstracción y se utiliza principalmente para problemas de nivel estratégico, como las tasas de adopción del mercado y la dependencia del proceso social.

El modelado de eventos discretos se usa principalmente a nivel operacional y táctico, como procesos de fabricación y evaluación de inversión de equipos.

Los modelos basados en agentes se utilizan en todos los niveles, y es posible que los agentes sean cualquier entidad activa. Las aplicaciones de ejemplo incluyen la optimización de la cadena de suministro y la epidemiología.

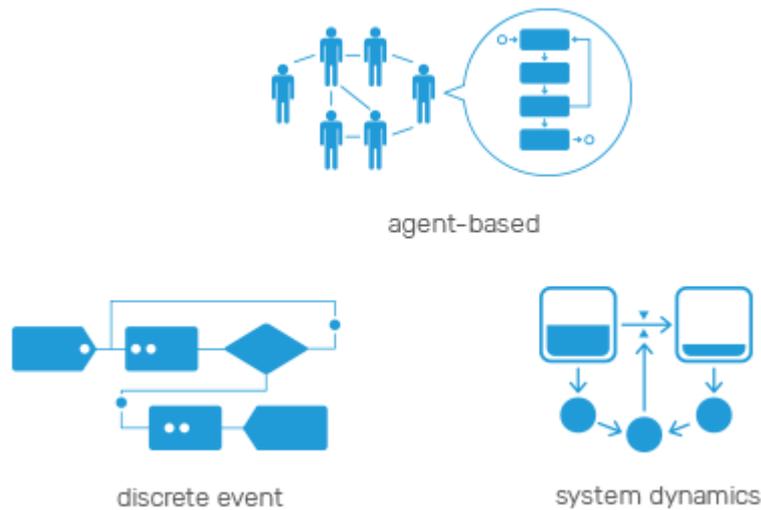


Ilustración 24. Métodos de modelado de simulación. Fuente: [www.Anylogic.com](http://www.Anylogic.com).

Construir un modelo requiere un nivel de simplificación. ¿Se puede tomar una visión amplia, o se deben capturar los detalles? Todo depende del sistema que se modele y del problema que necesite una solución.

Usando un único método, puede ser difícil modelar en el nivel apropiado de abstracción. Puede ser posible modelar las acciones de las entidades autónomas a través de la dinámica del sistema, pero es innecesario cuando las herramientas basadas en agentes evitan la necesidad de abstracciones y suposiciones adicionales. De forma similar, los métodos discretos son ineficientes para modelar variables continuas cuando los métodos de dinámica del sistema están disponibles.

La mayoría de los casos del mundo real son complejos, y es conveniente describir diferentes partes de un sistema con diferentes métodos. La capacidad de capturar sistemas comerciales con su complejidad real e interacciones puede verse seriamente limitada usando solo un método.

Deben excluirse algunos elementos del sistema o desarrollarse una solución alternativa.

- Si hay muchos objetos independientes, use un enfoque basado en agentes.
- Si solo hay información sobre dependencias globales, use la dinámica del sistema.
- Si un sistema se describe fácilmente como un proceso, utilice un enfoque de evento discreto.

- Si su sistema tiene todos esos aspectos, debería considerar combinar los tres métodos.

Tener acceso a todos los métodos simultáneamente le da la flexibilidad necesaria para resolver con éxito el problema en cuestión.



*Ilustración 25. Producción, distribución y modelo de mercado. Fuente: [www.Anylogic.com](http://www.Anylogic.com).*

Aquí puede ver cómo la producción, la distribución y el mercado se pueden combinar en un modelo usando diferentes técnicas. Un modelo de evento discreto describe los procesos dentro de cada almacén. Los almacenes aparecen como agentes en la red de distribución. Finalmente, el mercado, que impulsa el sistema, se modela con la dinámica del sistema.

**CAPÍTULO 4. ESTUDIO DE LOS**  
**CASOS PRÁCTICOS**

#### **4. INTERSECCIONES OBJETO DE ESTUDIO**

Una vez que se ha desarrollado la metodología a seguir a la hora de obtener el valor del nivel de servicio actual en las intersecciones, se procede a identificar las intersecciones semaforizadas objeto de estudio en el presente TFM.

Los motivos por los cuales se han elegido las siguientes intersecciones son:

- Intersección típica de una población pequeña y con pocos habitantes (pedanía) en la cual solamente hay una calle mayor por la que suelen pasar todos los vehículos.
- Intersección en una avenida que comunica un municipio con un núcleo urbano de la capital de Murcia.
- Intersección el pleno centro urbano con una alta densidad de vehículos.
- Percepción de los ciudadanos de que se puede mejorar el servicio en la intersección.

En primer lugar, se analizará una intersección de la Era Alta, una pedanía perteneciente al municipio de Murcia (3.092 habitantes. Fuente: INE 2016) la cual se encuentra a 3.5 km de Murcia, formada por la Calle Mayor que tras la intersección pasa a llamarse Avenida de Era Alta y la calle Dr. Tomás Pellicer Frutos que pasa a llamarse Camino Hondo tras el cruce.

En segundo lugar, una intersección localizada entre el municipio de Alcantarilla y la capital de Murcia, una avenida muy rectilínea que conecta varias pedanías con el centro urbano de Murcia, en la que se intersecan la Avenida Ciudad de Almería y el Carril Cascales

Por último, la tercera intersección se encuentra entre el céntrico Barrio del Carmen y el Barrio del Infante Don Juan Manuel, delimitada por la calle Torre de Romo y una de las arterias principales del barrio del Infante Don Juan Manuel, la Avenida San Juan de la Cruz que pasa llamarse Calle Mozart en su tramo final.



*Imagen 1. Localización de las intersecciones. Fuente: Google Earth*

Además, previamente a la exposición de los diferentes casos y las conclusiones obtenidas, es importante presentar la herramienta con la que se ha desarrollado el estudio.

En el caso del presente TFM, se ha elaborado una hoja de cálculo en el software informático Microsoft Excel, en la cual se ha implementado el método propuesto por el HCM para intersecciones semaforizadas con controladores de tiempos fijos, ya que todas las intersecciones analizadas respondían a este esquema. Así, se ha diseñado una hoja para cada una de las intersecciones, creando una pestaña para cada grupo de carril que se debía estudiar, teniendo en cuenta las diferencias observadas en éstos en relación al tipo de grupo de carril (compartido o exclusivo), al tipo de operación desarrollada desde ellos (protegida o permitida), a sus características geométricas particulares, etc.

En cuanto a la toma de datos, para los del tráfico se han realizado aforos manuales, eligiendo una duración aproximada de 15 minutos para los periodos de análisis, teniendo en cuenta los intervalos en los que se esperaba el mayor volumen de tráfico con el fin de analizar la situación más desfavorable posible.

Por otro lado, para los datos geométricos y para la selección de las diversas áreas y longitudes de influencia se han empleado herramientas como Google Earth, material fotográfico y diversas visitas de campo. Por último, se ha de señalar que la medida de la duración de las fases de la señalización también ha sido realizada en campo.

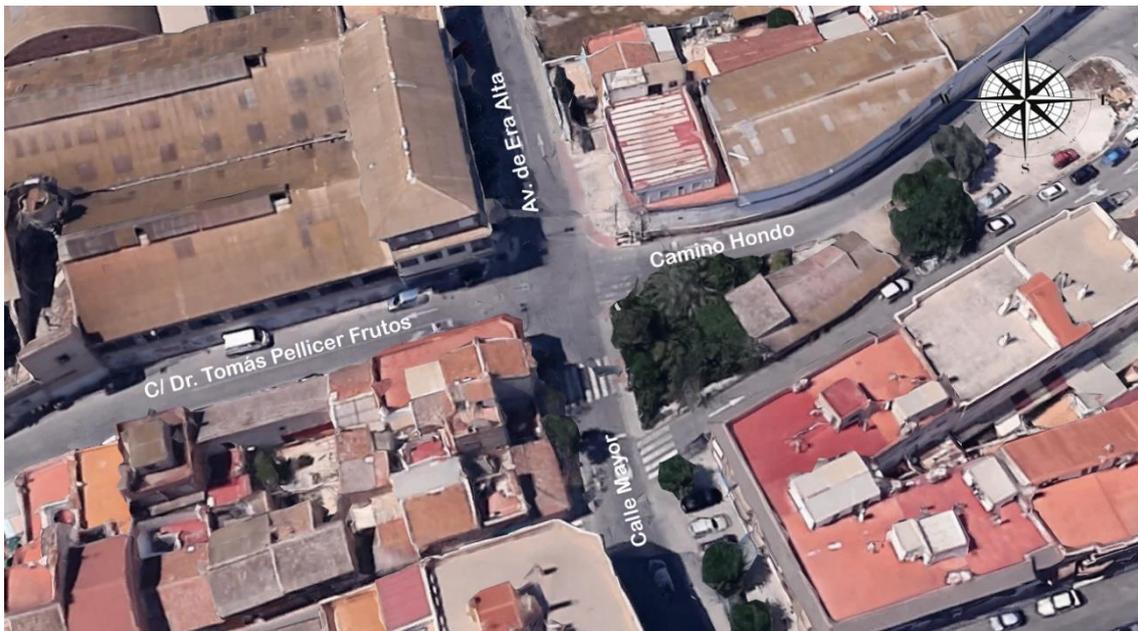
Finalmente, se debe destacar que para facilitar la toma de datos y la exposición de éstos en un mismo documento se han realizado croquis simplificados de la geometría de las intersecciones, en los que se plasman todos los datos de los aforos una vez que estos hayan concluido. Dichos croquis y planillas de toma de datos se muestran a continuación en cada uno de los casos prácticos que se analizan.

## **4.1. INTERSECCIÓN N°1. ERA ALTA**

### **4.1.1. Introducción**

Como intersección número 1 se ha escogido la formada por la calle Mayor de la localidad y la calle Dr. Tomás Pellicer Frutos, que pasa a llamarse Camino Hondo tras el cruce.

Es una de las principales intersecciones del pueblo donde pasan la mayoría de los vehículos, además, a unos 500 metros de ella se encuentra el colegio Ana María Matute, un centro privado de enseñanza infantil, primaria y secundaria, el cual es una de las principales fuentes de flujo de tráfico a la hora de entrada y salida.



*Imagen 2. Vista aérea de la intersección n°1. Fuente: Google Earth*

Esta intersección tiene la peculiaridad de que está formada por 4 ramas y desde cada una de ellas se puede hacer el movimiento de paso, el giro a derecha y el giro a izquierda, además, desde la Calle Mayor y la calle Dr. Tomás Pellicer frutos al hacer el giro a derechas se está realizando a la misma vez el movimiento de paso de los peatones, por lo

que puede entorpecer el flujo de vehículos, ya que sólo disponen de un carril. Por otro lado, el tráfico de peatones no es muy elevado al situarse al límite de la pedanía y, aunque, las ramas principales son la Calle Mayor y la avenida de Era Alta, por las otras ramas se puede acceder al colegio Ana María Matute.

Conocidos los motivos que han llevado a la elección de esta intersección para ser objeto de estudio, se procede a explicar en detalle los aspectos característicos de cada una de las ramas en relación a la distribución de carriles:

- Desde el acceso Sur (Calle Mayor) encontramos un solo carril, desde el cual podemos realizar el movimiento de paso hacia la avenida de Era Alta, el giro permitido a la derecha hacia el Camino Hondo donde se encuentra un paso de peatones y el giro a izquierdas permitido a la calle Dr. Tomás Pellicer Frutos. Además, se encuentra una parada de autobús unos 20 metros antes de la intersección.
- Desde el acceso Este (Camino Hondo) también dispone de un carril que permite el movimiento de paso, el giro a derechas protegido hacia la avenida de Era Alta y el giro a izquierdas permitido a la Calle Mayor donde se encuentra el otro paso de peatones.
- Desde el acceso Norte (Avenida de Era Alta) como las anteriores posee un solo carril y permite el movimiento de paso hacia la Calle Mayor, el giro protegido a derechas a la calle Dr. Tomás Pellicer Frutos y el giro permitido a izquierdas al Camino Hondo. En cuanto a la posibilidad de aparcamiento, dispone de unas 7 plazas posibles en su margen derecha.
- Desde el acceso Oeste (calle Dr. Tomás Pellicer Frutos) que tiene también un único carril se pueden realizar los movimientos de paso hacia el Camino Hondo, de giro permitido a la derecha a la Calle Mayor, donde se encuentra el paso de peatones y el giro permitido a izquierdas a la avenida de Era Alta. Además, posee unas 8 plazas de aparcamiento en línea en su margen derecha.

Así, el croquis diseñado para la toma de datos en la intersección representa la distribución de carriles expuesta en los párrafos anteriores con exactitud, correspondiente con la ilustración 26.

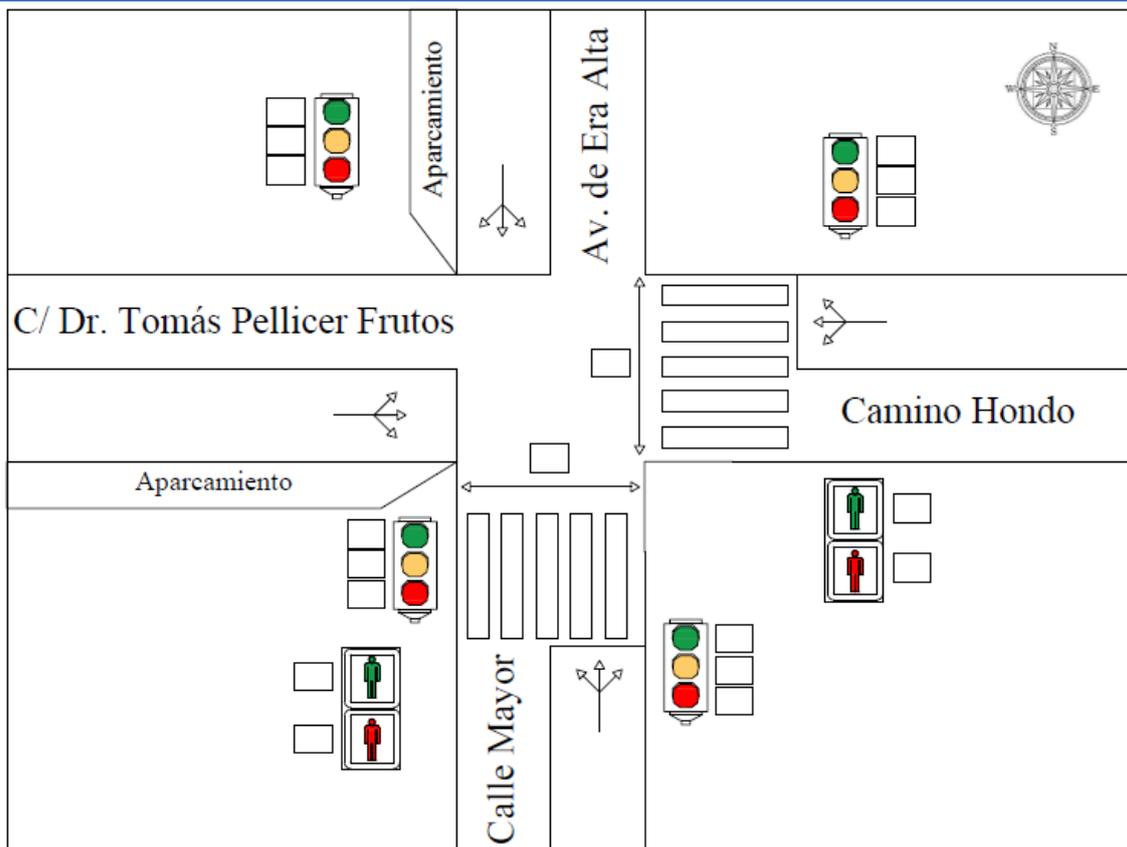


Ilustración 26. Croquis intersección nº1. Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2. Herramientas empleadas para el cálculo

Además del croquis de la intersección expuesto en la ilustración anterior, se han empleado otras herramientas para facilitar la toma de datos.

Como esta primera intersección no es muy complicada se ha podido realizar mediante un solo aforador dividiendo el ciclo de señalización en 2 fases, las cuales se desarrollan de la siguiente manera:

- Fase 1: Paso desde el acceso Sur y Norte. Durante esta fase el semáforo para vehículos del acceso Sur y Norte se muestra en verde, a la vez que el de peatones del acceso Este, quedando el resto en rojo, como se puede ver en la ilustración 21. La duración del verde es de 40 segundos, mientras que la del ámbar es de 3 segundos y la de rojo de 24 segundos.

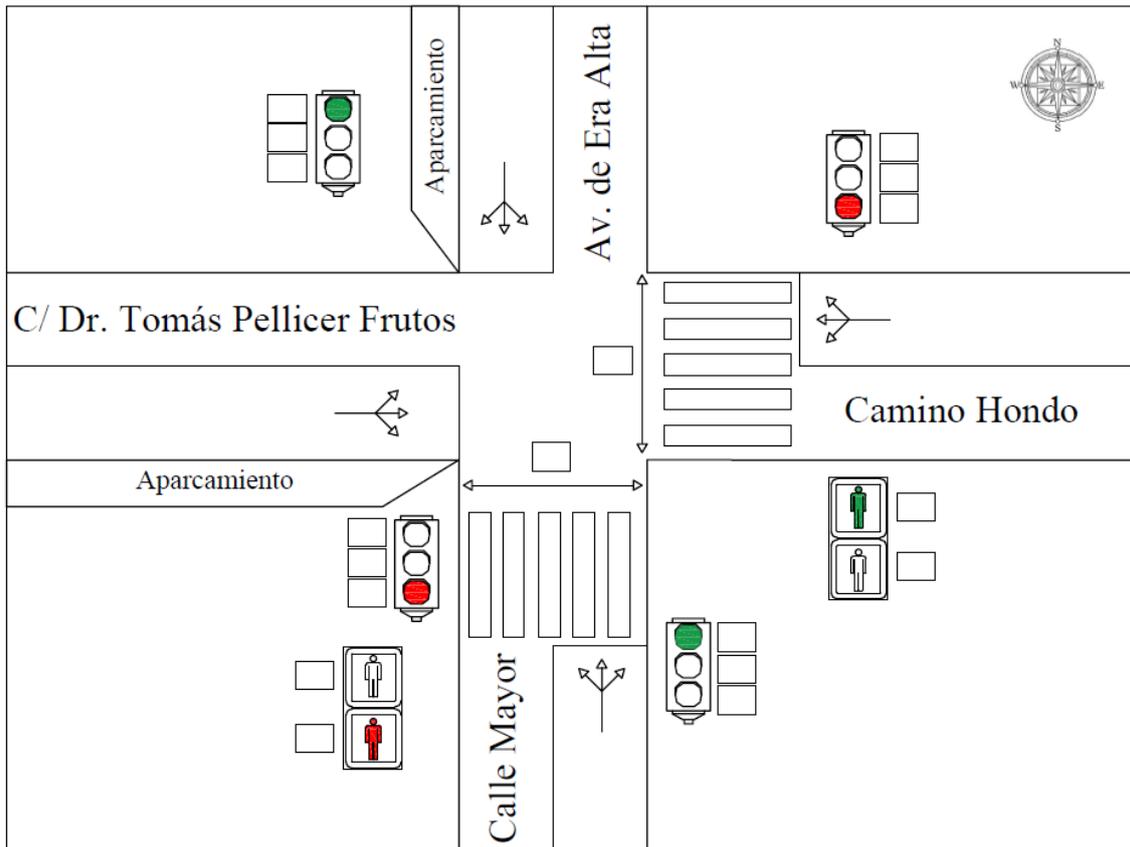


Ilustración 27. Fase 1 de la intersección nº 1. Fuente: Elaboración propia

- Fase 2: Paso desde el acceso Este y Oeste. Durante esta fase el semáforo da paso a los vehículos del acceso Este y Oeste, a la vez que el de peatones del acceso Sur, quedando el resto en rojo, véase la ilustración 22. La duración del verde es de 15 segundos, la del ámbar es de 3 segundos y la de rojo de 49 segundos.

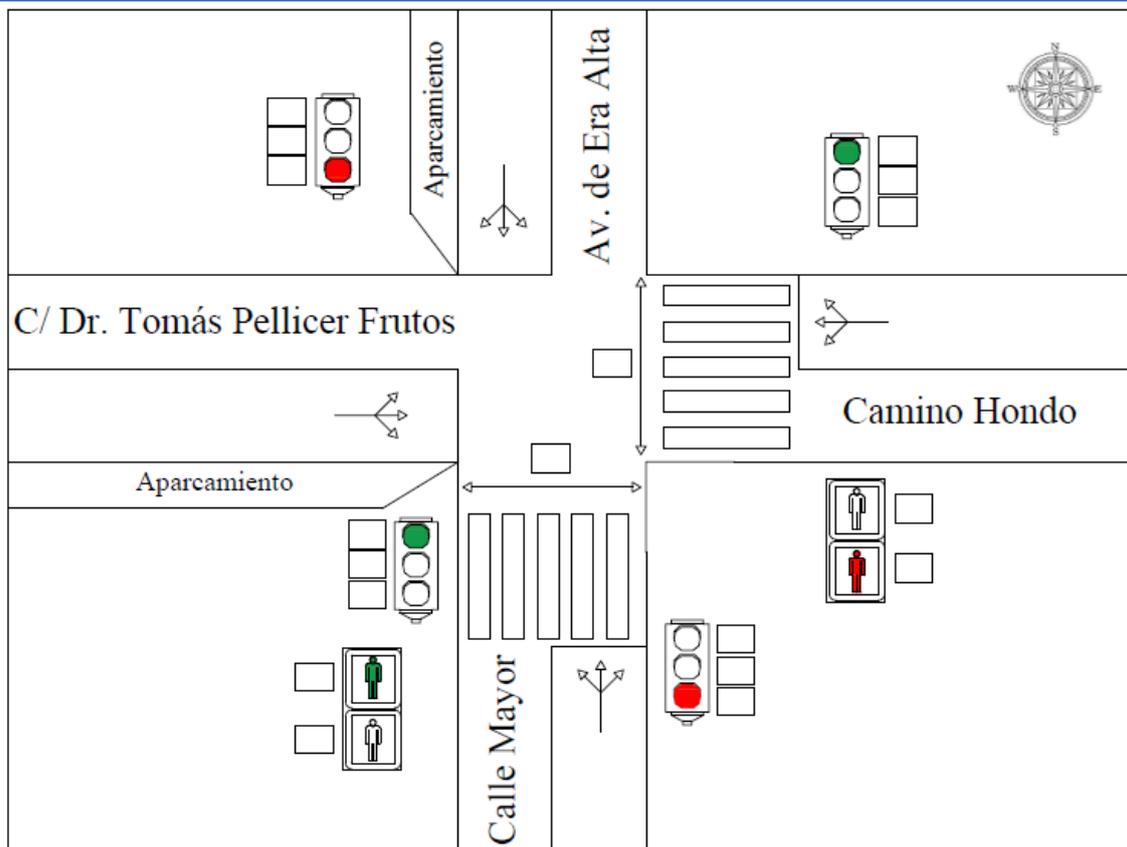


Ilustración 28. Fase 2 de la intersección n°1. Fuente: Elaboración propia

La planilla utilizada para la recolección de los datos referentes a la duración de las fases de la señalización fue la de la tabla 9.

Tabla 9. Planilla para determinación de fases. Fuente: Elaboración propia

	Planilla duración del ciclo (s)		
	Verde	Ámbar	Rojo
Fase 1			
Fase 2			

Por otro lado, las planillas empleadas para llevar a cabo el aforo de los vehículos fueron las siguientes, teniendo en cuenta el periodo de análisis fue de 14 minutos con 31 segundos ya que cada ciclo de señalización constaba de 67 segundos, por lo que se registraron 13 ciclos completos.

Análisis y mejora de intersecciones semaforizadas en Murcia mediante el control semafórico actuado por vehículos.

Tabla 10. Planilla de aforo 1. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Sur (Calle Mayor) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
Total								

Tabla 11. Planilla de aforo 2. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Norte (Av. De Era Alta) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
Total								

Tabla 12. Planilla de aforo 3. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Este (Camino Hondo) fase 2								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
Total								

Tabla 13. Planilla de aforo 4. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Oeste (calle Dr. Tomás Pellicer Frutos) fase 2								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
Total								

Por último, cabe destacar que el apartado de la planilla con el título de Veh. En cola al final del ciclo quiere referirse a los vehículos que se encontraban almacenados en cola durante la fase roja, que, tras completarse la fase verde, aún se quedaron acumulados en la cola.

#### **4.1.3. Datos obtenidos durante el aforo.**

Una vez que se han presentado las herramientas de trabajo utilizadas para la toma y representación de los datos, se pueden mostrar los resultados obtenidos para el periodo de estudio seleccionado, que, en el caso de la intersección nº1 fue el correspondiente al intervalo entre las 8:45 y las 9:00 del jueves 3 de mayo de 2018.

La elección de esta franja horaria es debido al hecho de que se comprobó que la hora de mayor afluencia de vehículos era a la hora de la entrada y a la salida del centro de enseñanza que se encuentra en sus cercanías, y como a la hora de la salida los vehículos acudían de manera escalonada debido a que se forman grandes atascos en las proximidades del colegio, la hora escogida es la de entrada, en la que la mayoría acuden unos minutos antes de que suene la sirena que da comienzo a las clases.

En cuanto al día de la semana, primeramente, se descartó el fin de semana, ya que es festivo y no acuden los vehículos al colegio y posteriormente se escogió un día entre semana donde el tráfico es sensiblemente mayor.

Presentados los motivos por los cuales se fijó la fecha y la hora del aforo, se pueden analizar los datos obtenidos para la duración de los ciclos de señalización, que fueron los mostrados en la tabla 14.

Tabla 14. Fases de señalización de la intersección n°1. Fuente: Elaboración propia

	Planilla duración del ciclo (s)		
	Verde	Ámbar	Rojo
Fase 1	40	3	24
Fase 2	15	3	49

Como se puede observar, el ciclo de señalización tiene una duración total de 67 segundos, divididas en 2 fases que combinan movimientos de vehículos con los de peatones. Entre ella destaca la escasa duración de la fase 2, que, aunque las ramas son secundarias, ya que en la otra fase se encuentra la calle Mayor y se espera un mayor volumen de tráfico, se encuentra en la dirección del centro de enseñanza y por este motivo puede dar problemas, que posteriormente se verán en los datos obtenidos.

Además, a simple vista se puede ver que la duración de la fase de ámbar junto a la fase verde no coincide con la duración de la fase roja de la fase contraria, lo que provoca que hay unos 6 segundos que en ambas fases no se permite el paso en ninguna dirección, pero al no estar sincronizados los ciclos de ambas fases, van con un desfase de 3 segundos con lo que una vez que se pone la fase roja en la fase 1, tarda unos 3 segundos en ponerse la fase verde en la fase 2 y viceversa. Esto puede ser debido a que hay unos pasos de peatones y con esos 3 segundos extra permitan llegar a la otra acera a los peatones y el cambio no sea ipso facto.

Por otro lado, los datos registrados referentes al tráfico motorizado se corresponden con las siguientes tablas:

Análisis y mejora de intersecciones semaforizadas en Murcia mediante el control semafórico actuado por vehículos.

Tabla 15. Datos planilla de aforo 1. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Sur (Calle Mayor) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	2	1	3	3	0	6	0	0
2	1	2	2	2	1	5	20	0
3	0	2	2	2	0	4	0	0
4	0	1	0	0	0	1	0	0
5	1	4	1	1	0	6	0	0
6	0	3	1	0	0	4	0	0
7	2	1	0	2	0	3	0	0
8	1	3	3	4	1	7	14,29	0
9	0	0	1	0	0	1	0	0
10	0	1	1	0	0	2	0	0
11	1	6	4	2	1	11	9,09	0
12	0	3	1	1	0	4	0	0
13	0	1	1	1	0	2	0	0
Total	8	28	20	18	3	56	3,34	0

Tabla 16. Datos planilla de aforo 2. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Norte (Av. De Era Alta) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	0	1	0	0	0	1	0	0
2	1	2	1	4	0	4	0	0
3	1	1	3	1	0	5	0	0
4	0	0	1	0	0	1	0	0
5	1	1	0	1	0	2	0	0
6	0	3	2	2	1	5	20	0
7	2	0	1	1	0	3	0	0
8	1	3	1	4	1	5	20	0
9	2	1	0	1	0	3	0	0
10	0	1	2	1	0	3	0	0
11	1	1	3	2	1	5	20	0
12	0	1	2	1	0	3	0	0
13	3	2	2	4	0	7	0	0
Total	12	17	18	22	3	47	4,62	0

Tabla 17. Datos planilla de aforo 3. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Este (Camino Hondo) fase 2								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	1	0	1	0	0	2	0	0
2	3	1	1	2	0	5	0	1
3	2	0	1	3	0	3	0	0
4	0	0	2	2	0	2	0	0
5	1	0	1	1	0	2	0	0
6	1	1	1	3	0	3	0	0
7	3	1	2	7	0	6	0	3
8	0	3	2	6	0	5	0	2
9	3	1	2	6	0	6	0	1
10	3	0	3	5	0	6	0	0
11	0	3	1	2	0	4	0	0
12	3	0	1	3	0	4	0	0
13	3	1	0	3	0	4	0	0
Total	23	11	18	43	0	52	0	7

Análisis y mejora de intersecciones semaforizadas en Murcia mediante el control semafórico actuado por vehículos.

Tabla 18. Datos planilla de aforo 4. Intersección 1. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Oeste (calle Dr. Tomás Pellicer Frutos) fase 2								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	4	1	0	6	0	5	0	1
2	3	0	1	5	1	4	25	1
3	3	1	0	2	0	4	0	0
4	3	0	0	2	0	3	0	0
5	1	2	0	1	0	3	0	0
6	1	0	2	2	0	3	0	0
7	0	1	1	2	0	2	0	0
8	1	0	0	1	0	1	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	1	1	0	3	0	0
11	2	1	2	4	1	5	20	0
12	0	0	1	0	0	1	0	0
13	1	3	2	6	0	6	0	0
Total	20	10	10	32	2	40	3,46	2

Se ha elaborado en croquis simplificado (véase ilustración 29) que resume los datos obtenidos en estas tablas ya que permite observar los valores de volumen de tráfico en un simple vistazo.

Por otro lado, los diversos datos necesarios para llevar a cabo el análisis de cada uno de los grupos de carriles, como por ejemplo la inclinación de la rasante, la tasa de aparcamientos o el ancho de carriles serán presentados al realizar el cálculo de cada uno de los grupos de carriles en particular.

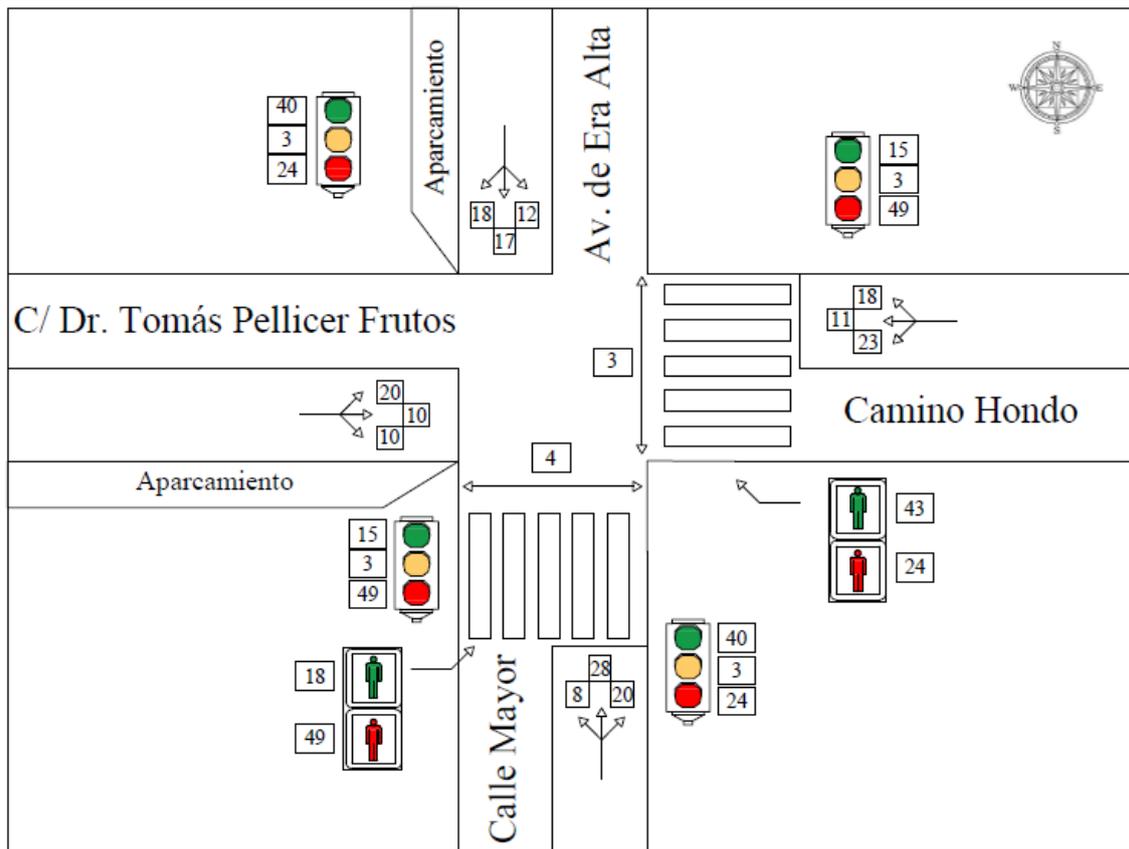


Ilustración 29. Croquis completo intersección nº1. Fuente: Elaboración propia

Los datos mostrados en el croquis son los siguientes:

- Junto a cada una de las flechas que representan los movimientos permitidos, el volumen de vehículos registrados para dicho movimiento. Es importante destacar que como cada carril compartido permite 3 movimientos se registran el número de vehículos que hace cada uno de los movimientos, por ejemplo, en el acceso desde la calle Mayor se indica que 8 vehículos hacen el movimiento de giro a izquierdas, 28 el de paso y 20 el giro a derechas.
- Junto a cada semáforo se muestran los valores de la duración de cada una de las fases, es decir, la verde, ámbar y roja, tanto para los de los vehículos como los de peatones que se encuentran referenciados mediante una flecha.
- Por último, junto a cada uno de los pasos de peatones se muestra el dato registrado referente al volumen de peatones que cruzaron en el periodo de estudio en ambas direcciones

#### **4.1.4. Aplicación del método del HCM a la intersección n°1.**

Para llevar a cabo la aplicación del método del HCM y calcular el nivel de servicio de esta intersección se seguirá el proceso que se desarrolló en el capítulo 3 del presente TFM, pero teniendo en cuenta las peculiaridades de cada uno de los casos a estudiar y que al tratarse de una intersección con controladores de tiempos fijos, el paso 6 podrá ser omitido.

Como ya se expuso con anterioridad, el primer paso a la hora de analizar el nivel de servicio con el que podemos calificar la intersección consiste en la determinación de los diferentes grupos de carriles y de movimientos que podemos encontrar en ella. Así, para una mayor facilidad, se ha optado por analizar dichos conceptos a nivel de rama o acceso.

Además, es conveniente recordar los criterios empleados para la determinación de los grupos de carriles o de movimientos, que se corresponden con los siguientes:

Determinaremos como grupo de movimiento los siguientes casos:

- Un movimiento de giro que sea servido por uno o más carriles exclusivos.
- Los carriles no asignados a un grupo por la regla anterior han de combinarse en un grupo de movimiento.

Por otro lado, para diferenciar los grupos de carriles emplearemos los siguientes criterios:

- Uno o más carriles exclusivos de giro a la izquierda o de giro a la derecha deben designarse como un grupo de carriles.
- Los carriles compartidos deben designarse como un grupo.
- Los carriles que no sean compartidos o exclusivos de giro han de combinarse en un único grupo.

#### **Estudio del acceso Sur. Calle Mayor**

Analizaremos en primer lugar el acceso Sur, en el que se encuentra la siguiente situación.



*Imagen 3. Intersección nº1. Acceso Sur. Fuente: Elaboración propia.*

Como se puede observar en esta imagen y en las tablas anteriormente expuestas en este capítulo, en este acceso se encuentra un solo carril que permite tanto el movimiento de paso, giro a izquierda y giro a derecha. Por lo tanto, se dispone de un solo grupo de carriles que será calculado de la manera que fue expuesta en el capítulo 3.

### **Grupo de carriles 1. Carril compartido de paso, giro a izquierda y derecha.**

Con carácter previo al cálculo del flujo ajustado de saturación hemos de calcular los valores de los factores correctores, para los cuales serán necesarios una serie de datos referentes a la geometría del carril y la rasante, los vehículos pesados que por el transitan, etc.

Así, fijaremos en primer lugar el flujo base de saturación, que como la intersección estudiada se encuentra en una población de 3.092 habitantes, es decir, menor de 250.000 habitantes el valor utilizado será el marcado el en HCM.

$$s_0 = 1750 \frac{veh}{h \cdot carril}$$

Seguido del factor de ajuste por ancho de carril empleando, que para ello utilizaremos la tabla presentada en el capítulo 3. De este modo, sabiendo que el ancho del carril

compartido es de 3.6 metros, es decir, se encuentra entre los 3 metros y los 3.92 metros, el valor del factor  $f_w$  será de 1.

En segundo lugar, calcularemos el valor del factor de ajuste por vehículos pesados, sabiendo que en este carril el porcentaje de vehículos pesados es del 3.34 % y empleando para ello la siguiente ecuación:

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_{HV}(E_T - 1)} = \frac{100}{100 + 3.34 \cdot (2 - 1)} = 0.9676$$

Posteriormente calcularemos el valor del factor corrector por inclinación de la rasante, conociendo que el valor de ésta será del 0%.

$$f_g = 1 - \frac{P_g}{200} = 1 - \frac{0}{200} = 1$$

Tras el factor de inclinación de la rasante podemos calcular el valor del factor corrector por las maniobras de aparcamiento que afecten al carril que se esté estudiando. En este caso el valor de dicho factor será 1, pues el carril exclusivo no es contiguo a ninguna zona destinada al aparcamiento de vehículos.

$$f_p = 1$$

A continuación, debemos calcular el factor de ajuste por bloqueo de autobuses, que en este caso, como se encuentra una parada de autobús a escasos metros de la intersección debemos tenerla en cuenta, y sabiendo que pasa 1 autobús cada media hora sustituimos en la siguiente ecuación.

$$f_{bb} = \frac{N - \frac{14.4 \cdot N_b}{3600}}{N} = \frac{1 - \frac{14.4 \cdot 2}{3600}}{1} = 0.992 \geq 0.05$$

El siguiente factor es el de ajuste por tipo de área, que como en este caso es la intersección se encuentra en la calle Mayor del pueblo se puede decir que es una zona de negocios como se define en el HCM tomando su valor de referencia.

$$f_a = 0.9$$

El factor de ajuste por uso de carril se emplea únicamente en aquellos grupos de carriles que tienen más de un carril exclusivo, por tanto, en el caso que se está estudiando el valor será unitario.

$$f_{LU} = 1$$

Calculados los factores anteriores, se procede a presentar el método expuesto en el capítulo 31 del HCM, que aunque no contempla el caso de carril compartido para movimiento de paso, giro a derecha permitido y giro a izquierda permitido, se utilizará el descrito en el apartado de carril compartido para movimiento de paso y giro a derecha permitido y se le aplicará un factor para tener en cuenta los giros a izquierda permitidos desde un carril compartido teniendo en la corriente opuesta un solo carril, de modo que la ecuación para obtener el flujo de saturación quedaría de la siguiente forma:

$$s_{sr} \cdot s_{sl2} = s_{th} \cdot \frac{1}{1 + P_R \cdot (E_{R,m} - 1)} \cdot \frac{1}{1 + P_L \cdot \left( \frac{E_{L2}}{f_{Lpb}} - 1 \right)}$$

Donde:

- $s_{sr}$ : Flujo de saturación ajustado para carril compartido de paso y giro a derecha (veh/h·carril)
- $s_{th}$ : Flujo de saturación para carril exclusivo de paso.  $s_{th} = s_0 \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU}$
- $s_{sl2}$ : Flujo de saturación ajustado para carril compartido de paso y giro a izquierda cuando sólo hay un carril en el flujo opuesto (veh/h·carril)

Comenzamos por el primer término de la ecuación.

$$\begin{aligned} s_{th} &= s_0 \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} = 1750 \cdot 1 \cdot 0.9676 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.992 \cdot 0.9 \cdot 1 = \\ &= 1511.77 \frac{veh}{h \cdot carril} \end{aligned}$$

Continuamos resolviendo la segunda parte de la ecuación.

$$\frac{1}{1 + P_R \cdot (E_{R,m} - 1)}$$

Donde:

- $P_R$ : Proporción de vehículos que giran a la derecha (decimal)
- $E_{R,m}$ : Factor de equivalencia modificado de vehículos que giran a la derecha respecto a los que realizan el movimiento de paso.
- $f_{Rpb}$ : Factor de ajuste de peatones y bicicletas para grupos de giro a la derecha

Para la aplicación de la ecuación anterior es necesario calcular el valor de  $E_{R,m}$ , mediante la siguiente expresión.

$$E_{R,m} = \left( \frac{E_R}{f_{Rpb}} - 1 \right) \cdot P_{lc} + 1$$

Donde:

- $E_{R,m}$ : Factor de equivalencia modificado de vehículos que giran a la derecha respecto a los que realizan el movimiento de paso.
- $E_R$ : Número de vehículos de paso equivalente a cada vehículo que gira a la derecha en fase protegida = 1.18
- $f_{Rpb}$ : Factor de ajuste de peatones y bicicletas para grupos de giro a la derecha
- $P_{lc}$ : Probabilidad de cambio de carril en el acceso a la intersección

El valor de  $P_{lc}$  se obtiene aplicando la siguiente ecuación.

$$P_{lc} = 1 - \left( \left[ 2 \cdot \frac{v_{app}}{s_{lc}} \right] - 1 \right)^2 \geq 0$$

Donde:

- $P_{lc}$ : Probabilidad de cambio de carril en el acceso a la intersección
- $v_{app}$ : Demanda media en el acceso (veh/h·carril)
- $s_{lc}$ : Tráfico máximo para que se produzcan cambios de carril =  $3600 / 3.7 = 972.973$

Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$P_{lc} = 1 - \left( \left[ 2 \cdot \frac{224}{972.973} \right] - 1 \right)^2 = 0.7088 \geq 0 \rightarrow ok$$

Para calcular  $E_{R,m}$  necesitamos conocer  $f_{Rpb}$ .

Así, con carácter previo a la exposición del método se deben presentar las observaciones referidas en el apartado “3.2.2.1. Paso 4” del presente TFM para la interferencia de los movimientos de vehículos, peatones y bicicletas en los giros a la derecha.

- Si no existen peatones o bicicletas en conflicto con el movimiento de giro a la derecha, el valor de  $f_{Rpb}$  será igual a 1.

- Si se realiza el giro como una operación protegida, el valor de  $f_{Rpb}$  será igual a 1.
- Si se realiza el giro bajo una operación protegida-permitida, el procedimiento a emplear para el cálculo del valor de  $f_{Rpb}$  será el primero de los dos descritos en el capítulo 31 de la instrucción americana.

Por tanto, utilizaremos el primer método descrito en dicho apartado.

i. Determinación del flujo de peatones durante su fase verde.

$$v_{pedg} = v_{ped} \cdot \frac{C}{g_{ped}} = 12 \cdot \frac{67}{43} = 18.69 \frac{\text{peatones}}{h} \leq 5000 \rightarrow ok$$

Donde:

- $v_{pedg}$ : Peatones durante la fase verde (peatones/h)
- $v_{ped}$ : Peatones que interfieren con el giro que se está estudiando (peatones/h)
- $C$ : Duración del ciclo (s)
- $g_{ped}$ : Duración del verde para peatones (s)

ii. Determinación de la ocupación media de los peatones.

En este apartado se determina un factor que representa la ocupación media de los peatones de la zona de conflicto de movimientos, teniendo en cuenta que el valor obtenido en el apartado anterior  $v_{pedg}$  es menor o igual que 1000 peatones/h se emplea la siguiente expresión:

$$OCC_{pedg} = \frac{v_{pedg}}{2000} = \frac{18.69}{2000} = 0.0093$$

Donde:

- $OCC_{pedg}$ : Ocupación de la zona de conflicto por los peatones
- $v_{pedg}$ : Peatones durante la fase verde (peatones/h)

iii. Determinación del flujo de bicicletas durante su indicación verde.

En el caso de la intersección que se está estudiando, el flujo de bicicletas es despreciable.

iv. Determinación de la ocupación media de las bicicletas

En el caso de la intersección que se está estudiando, el flujo de bicicletas es despreciable.

v. Determinación de la ocupación relevante de la zona de conflicto.

En este paso se transforma la ocupación media de los peatones y bicicletas calculadas en los apartados anteriores a una ocupación relevante, obtenida esta última como una combinación de las anteriores. Para ello, se han de tener en cuenta las características de confluencia de los diversos movimientos.

Para giros a la derecha sin interferencia de bicicletas, como es el caso se utiliza la siguiente ecuación:

$$OCC_r = \frac{g_{ped}}{g} \cdot OCC_{pedg} = \frac{43}{43} \cdot 0.0093 = 0.0093$$

Donde:

- $OCC_r$ : Ocupación relevante de la zona de conflicto
- $g_{ped}$ : Duración del verde para peatones (s)
- $g$ : Verde efectivo (s)
- $OCC_{pedg}$ : Ocupación de la zona de conflicto por los peatones

Como se puede observar, debido a que la duración de la fase verde para los peatones coincide en esta intersección con la duración del verde efectivo de los vehículos (verde + ámbar), la ocupación relevante será equivalente a la ocupación anterior.

vi. Determinación del tiempo desocupado de la zona de conflicto.

Teniendo en cuenta que el número de carriles emisores de vehículos que realizan el giro es igual al de carriles receptores, el valor vendrá dado por la siguiente ecuación.

$$A_{pbT} = 1 - OCC_r = 1 - 0.0093 = 0.9907$$

Donde:

- $A_{pbT}$ : Tiempo durante el cual la zona de conflicto se encuentra desocupada
- $OCC_r$ : Ocupación relevante de la zona de conflicto

vii. Determinación del factor de ajuste para el flujo de saturación.

Para determinar el valor definitivo del factor corrector para el flujo base de saturación se tendrá en cuenta que se trata de un giro a la derecha realizado como operación permitida. Por lo que el valor de  $f_{Rpb}$  será igual al de  $A_{pbT}$

$$f_{rpb} = A_{pbT} = 0.9907$$

Una vez tenemos este dato podemos sustituir en la ecuación de  $E_{R,m}$ .

$$E_{R,m} = \left( \frac{E_R}{f_{Rpb}} - 1 \right) \cdot P_{lc} + 1 = \left( \frac{1.18}{0.9907} - 1 \right) \cdot 0.7088 + 1 = 1.1354$$

Por último, procedemos a calcular la tercera parte de la ecuación.

$$\frac{1}{1 + P_L \cdot \left( \frac{E_{L2}}{f_{Lpb}} - 1 \right)}$$

Donde:

- $P_L$ : Proporción de vehículos que giran a la izquierda (decimal)
- $E_{L2}$ : Factor de equivalencia de vehículos que giran a la izquierda respecto a los que realizan el movimiento de paso cuando se opone solamente el flujo de un carril
- $f_{Lpb}$ : Factor de ajuste de peatones y bicicletas para grupos de giro a la izquierda

Para la aplicación de la ecuación anterior es necesario calcular el valor de  $E_{L2}$  mediante la siguiente expresión.

$$E_{L2} = \frac{1 - (1 - P_{lt0})^{n_q}}{P_{lt0}}$$

Donde:

- $P_{lt0}$ : Proporción de vehículos que giran a la izquierda en la corriente de tráfico opuesta
- $n_q$ : Número máximo de vehículos que se oponen que podrían llegar después de  $g_f$  y antes de  $g_u$ .

Debemos de calcular el valor de  $n_q$  para poder sustituir en la ecuación anterior y lo haremos median la siguiente expresión:

$$n_q = 0.278 \cdot (g_p - g_u - g_f) \geq 0$$

Donde:

- $g_p$ : Tiempo de verde efectivo para el giro a izquierda permitido (s)

- $g_u$ : Duración del giro a izquierda permitido que no es bloqueado por ningún vehículo del flujo opuesto (s)
- $g_f$ : Tiempo antes de que el primer giro a izquierda llegue y bloquee el carril compartido (s)

Calcularemos primero  $g_p$  que viene dado por la siguiente expresión:

$$g_p = G_p - l_{1,p} + e_p \geq 0$$

Donde:

- $G_p$ : Intervalo de verde expuesto correspondiente a  $g_p$
- $l_{1,p}$ : Tiempo perdido de puesta en marcha (s)
- $e_p$ : Extensión permitida del verde efectivo (s)

Éstos dos últimos parámetros se pueden obtener de la tabla 31-16 del capítulo 31 del HCM en la tercera y cuarta columna, y en este caso ambas equivalen a 2 segundos, con lo que podemos sustituir en la ecuación.

$$g_p = G_p - l_{1,p} + e_p = 40 - 2 + 2 = 40 \text{ s}$$

Continuamos calculando el valor de  $g_u$ .

$$g_u = G_u + e_p \leq g_p$$

Como esta intersección sólo dispone de 2 fases en las cuales el movimiento de giro a izquierda está permitido, el HCM da la siguiente expresión para calcular  $G_u$ .

$$G_u = D_{p2} - Y_6 - R_{C6} - G_{q2} = 67 - 3 - 24 - 40 = 0$$

Donde:

- $D_p$ : Duración del ciclo
- $Y$ : Duración de la fase ámbar
- $R_c$ : Duración de la fase roja
- $G_q$ : Intervalo de la fase verde correspondiente a  $g_q$

Es necesario aclarar que los subíndices numéricos se refieren al movimiento que se producen en la intersección en el orden ya mencionado en el presente TFM.

Sustituyendo en la ecuación anterior.

$$g_u = 0 + 2 = 2 \text{ s} \leq 40 \rightarrow ok$$

Finalmente queda por calcular  $g_f$ , que como sólo hay un carril que se oponga al movimiento de giro a izquierda, el HCM propone la siguiente expresión.

$$g_f = \max(G_p \cdot e^{-0.86 \cdot LTC^{0.629}} - l_{1,p}, 0) \leq g_{f,max}$$

Siendo:

$$g_{f,max} = \frac{(1 - P_L)}{0.5 \cdot P_L} \cdot (1 - [1 - P_L]^{0.5 \cdot g_p}) - l_{1,p} \geq 0$$

$$LTC = \frac{v_{lt} \cdot C}{3600}$$

Donde:

- LTC: Ratio de giro a izquierda por ciclo (veh/ciclo)
- $v_{lt}$ : Ratio de flujo de demanda de giro a izquierda (veh/h)
- C: Duración del ciclo completo

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores.

$$LTC = \frac{32 \cdot 67}{3600} = 0.595 \text{ veh/ciclo}$$

$$g_{f,max} = \frac{\left(1 - \frac{8}{56}\right)}{0.5 \cdot \frac{8}{56}} \cdot \left(1 - \left[1 - \frac{8}{56}\right]^{0.5 \cdot 40}\right) - 2 = 9.45 \geq 0 \rightarrow ok$$

$$g_f = \max(40 \cdot e^{-0.86 \cdot 0.595^{0.629}} - 2, 0) \leq g_{f,max}$$

$$g_f = \max(19.5, 0) \leq 9.45$$

$$g_f = 9.45 \text{ s}$$

Una vez tenemos este resultado podemos sustituir en las ecuaciones anteriores.

$$n_q = 0.278 \cdot (40 - 2 - 9.45) \geq 0$$

$$n_q = 7.94 \text{ veh} \geq 0 \rightarrow ok$$

$$E_{L2} = \frac{1 - \left(1 - \frac{12}{47}\right)^{7.94}}{\frac{12}{47}} = 3.92$$

Y por último sustituir en la tercera parte de la ecuación.

$$\frac{1}{1 + P_L \cdot \left(\frac{E_{L2}}{f_{Lpb}} - 1\right)} = \frac{1}{1 + \frac{8}{56} \cdot \left(\frac{3.92}{1} - 1\right)} = 0.7056$$

Cabe destacar que  $f_{Lpb}$  es igual a la unidad porque el tráfico de peatones y bicicletas no tiene interferencia en el giro permitido a izquierda.

Siendo finalmente el flujo ajustado de saturación el siguiente:

$$\begin{aligned} s_{sr} \cdot s_{sl2} &= 1511.77 \cdot \frac{1}{1 + \frac{20}{56} \cdot (1.1354 - 1)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{8}{56} \cdot \left(\frac{3.92}{1} - 1\right)} \\ &= 1017.5 \text{ veh/hora} \end{aligned}$$

Conocido el valor del flujo ajustado de saturación podemos calcular la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde. Para ello será necesario definir previamente el tipo de llegada del grupo de carriles y conocer la duración de la fase verde y del ciclo completo de señalización.

Así pues, en el caso que estamos estudiando, podemos considerar que la llegada será tipo 4, pues entre el 40 y el 80 % de los vehículos llegan durante la fase verde a la intersección, en grupos moderadamente densos y provocando pocas colas. Esto supone que el valor del coeficiente de grupo sea de 1.33 de acuerdo al criterio del HCM, como se puede ver en la tabla 5 del presente TFM.

Por tanto, sabiendo que la duración de la fase verde para este semáforo es de 40 segundos y que el ciclo dura 67 segundos, el valor de la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde será el siguiente:

$$P = R_p \cdot \frac{g}{C} = 1.33 \cdot \frac{40}{67} = 0.794$$

→ El 79.4 % de los vehículos llega durante la fase verde

Por último, antes de pasar al cálculo de los retrasos producidos en el grupo de carriles, debemos obtener el valor del ratio volumen capacidad de dicho grupo. Para ello será

necesario calcular en primer lugar la capacidad de la intersección, empleando los valores del número de carriles que hay en el grupo (N), el flujo ajustado de saturación (s) y la duración de la fase verde (g) y del ciclo completo (C). Así, la capacidad en el grupo de carriles que estamos estudiando será:

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 1017.5 \cdot \frac{40}{67} = 607.5 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{56 \cdot \frac{60}{14.52}}{607.5} = 0.381$$

Conocido el ratio volumen-capacidad podemos pasar a calcular los retrasos, a través de los cuales estaremos en disposición de clasificar la intersección en un determinado nivel de servicio. Dicho cálculo estará dividido en dos partes. Así, comenzaremos calculando el retraso uniforme y posteriormente le añadiremos el valor del retraso incremental, obteniendo de este modo el valor total de los retrasos generados para los usuarios de este grupo de carriles.

### Retraso uniforme

Para el cálculo del retraso uniforme es necesaria la construcción de los polígonos de acumulación de colas, para lo que debemos emplear los siguientes datos:

Tabla 19. Datos sobre la señalización. Acceso Sur. Grupo de carriles 1.

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	40
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	24
Duración del ciclo	67

Tabla 20. Datos sobre demanda. Acceso Sur. Grupo de carriles 1.

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	56
Vehículos por ciclo	4,3
Media de vehículos en cola por ciclo	1,38
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	4,15

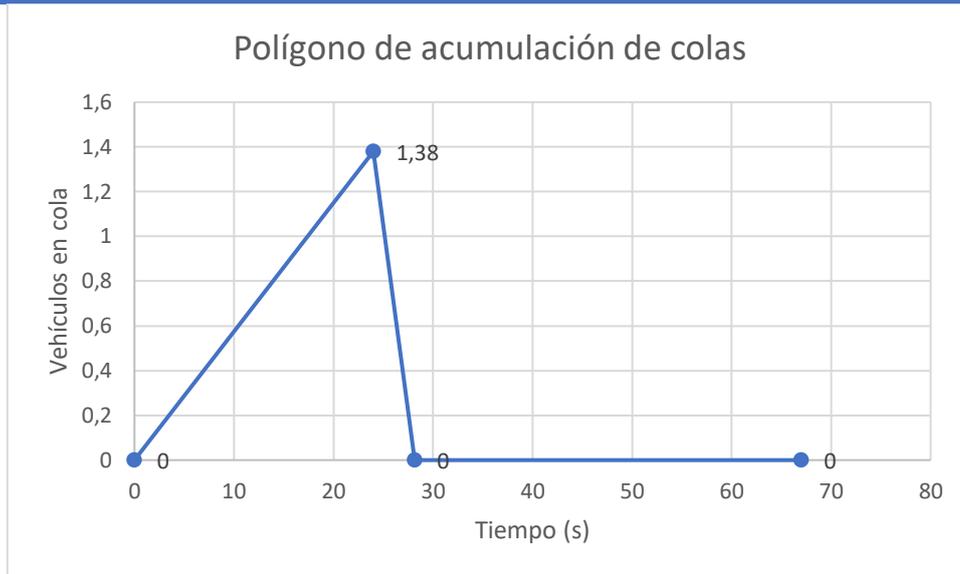


Ilustración 30. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº1. Acceso Sur. Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(24 + 4.15) \cdot 1.38}{2} = 19.42 \text{ segundos}$$

$$\text{Retraso uniforme} = \frac{19.42}{4.3} = 4.52 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso incremental

Por otro lado, debemos calcular el valor del retraso incremental, el cual se obtendrá mediante la aplicación directa de una ecuación en la cual se han de emplear los siguientes valores:

Tabla 21. Datos para retraso incremental. Intersección nº1. Acceso Sur.

Duración del periodo de análisis (T)	0,242 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,381
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	607,5 veh/h

Entre ellos podemos encontrar el valor de la duración del periodo de análisis, que en este caso será de 0.242 correspondiéndose con los 14 minutos y 31 segundos estudiados. También podemos observar el valor de un factor k, el cual, para intersecciones con controladores preprogramados será de 0.5 y un valor dependiente de la señalización

anterior, que será igual a 1 debido a que en el caso de este grupo de carril podemos considerar que la intersección es independiente de las situadas antes de llegar a ella. Así, el valor del retraso incremental será el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.242 \cdot \left[ (0.381 - 1) + \sqrt{(0.381 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.381}{607.5 \cdot 0.242}} \right]$$

$$= 1.81 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del carril compartido del acceso Sur será de:

$$R = R_u + R_i = 4.52 + 1.81 = 6.33 \text{ segundos/vehículo}$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando tiene un Nivel de Servicio A.

Tabla 22. Resumen resultados. Acceso Sur. Intersección nº1

RESUMEN ACCESO SUR	
Retraso (s /veh)	6,33
Ratio Vol - Cap	0,381
Nivel de servicio	NS A

### Estudio del acceso Oeste. Calle Dr. Tomás Pellicer Frutos

Tras haber analizado el acceso Sur de la intersección, continuamos con el acceso Oeste, que es similar al anterior, ya que tiene el movimiento de paso, el movimiento de giro a la derecha permitido al encontrarse un paso de peatones en las inmediaciones y el giro a izquierda permitido, debido a que se encuentra obstaculizado por el flujo de vehículos del carril opuesto.

Así, la situación a pie de la carretera es la que se puede observar a continuación.



*Imagen 4. Intersección n°1. Acceso Oeste. Fuente: Elaboración propia*

Como en el acceso anterior, dispone de un solo grupo de movimiento, el del carril compartido de paso, giro a izquierda y derecha, con la diferencia de que dispone de una zona de aparcamientos en su lateral derecho, y no presenta ninguna parada de autobús en las cercanías, lo que se verá reflejado a la hora del cálculo de los factores correctores.

### **Grupo de carriles 1. Carril compartido de paso, giro a izquierda y derecha.**

Comenzamos calculando los factores correctores como en el acceso Sur, teniendo el mismo flujo base de saturación  $s_0 = 1750$  veh / h-carril y el mismo factor de ajuste por ancho de carril  $f_w = 1$ .

Seguimos calculando el factor de ajuste por vehículos pesados, sabiendo que en este carril el porcentaje de vehículos pesados es del 3.46 %.

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_{HV}(E_T - 1)} = \frac{100}{100 + 3.46 \cdot (2 - 1)} = 0.9665$$

Como la inclinación de la rasante es del 0 %.

$$f_g = 1 - \frac{P_g}{200} = 1 - \frac{0}{200} = 1$$

Para obtener el valor del factor corrector por maniobras de aparcamiento adyacentes utilizaremos la expresión propuesta por el HCM, en la cual será necesario incluir el ratio

de maniobras de aparcamiento por hora observado. En este caso el carril dispone de unas 7 plazas legales de aparcamiento en la zona de la intersección, las maniobras de aparcamiento son escasas ya que los vehículos realizaban estacionamientos de larga duración por lo que se ha observado un ratio de 3 maniobras por hora. Con esta tasa y sabiendo que el grupo de carriles está formado por tan solo un carril, el factor corrector será el siguiente.

$$f_p = \frac{N - 0.1 - \frac{18 \cdot N_m}{3600}}{N} = \frac{1 - 0.1 - \frac{18 \cdot 3}{3600}}{1} = 0.885$$

Por otro lado, como no hay ninguna parada de autobús en la zona de influencia de la intersección el factor de corrección debido a las paradas de los vehículos de transporte urbano será unitario.  $f_{bb} = 1$

El factor de ajuste por tipo de área y el de ajuste por uso de carril siguen siendo los mismos,  $f_a = 0.9$  y  $f_{LU} = 1$

Una vez tenemos los factores de corrección comentamos a calcular el flujo de saturación de la misma manera que el acceso anterior.

$$s_{th} = s_0 \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} = 1750 \cdot 1 \cdot 0.9665 \cdot 1 \cdot 0.885 \cdot 1 \cdot 0.9 \cdot 1 =$$

$$= 1347.18 \frac{veh}{h \cdot carril}$$

$$P_{lc} = 1 - \left( \left[ 2 \cdot \frac{160}{972.973} \right] - 1 \right)^2 = 0.5496 \geq 0 \rightarrow ok$$

$$v_{pedg} = v_{ped} \cdot \frac{C}{g_{ped}} = 16 \cdot \frac{67}{18} = 59.55 \frac{peatones}{h} \leq 5000 \rightarrow ok$$

$$OCC_{pedg} = \frac{v_{pedg}}{2000} = \frac{59.55}{2000} = 0.0297$$

$$OCC_r = \frac{g_{ped}}{g} \cdot OCC_{pedg} = \frac{18}{18} \cdot 0.0297 = 0.0297$$

$$A_{pbT} = 1 - OCC_r = 1 - 0.0297 = 0.9702$$

$$f_{rpb} = A_{pbT} = 0.9702$$

$$E_{R,m} = \left( \frac{E_R}{f_{Rpb}} - 1 \right) \cdot P_{lc} + 1 = \left( \frac{1.18}{0.9702} - 1 \right) \cdot 0.5496 + 1 = 1.1188$$

$$g_p = G_p - l_{1,p} + e_p = 15 - 2 + 2 = 15 \text{ s}$$

$$G_u = D_{p2} - Y_6 - R_{C6} - G_{q2} = 67 - 3 - 49 - 15 = 0$$

$$g_u = 0 + 2 = 2 \text{ s} \leq 15 \rightarrow ok$$

$$LTC = \frac{80 \cdot 67}{3600} = 1.49 \text{ veh/ciclo}$$

$$g_{f,max} = \frac{\left(1 - \frac{20}{40}\right)}{0.5 \cdot \frac{20}{40}} \cdot \left(1 - \left[1 - \frac{20}{40}\right]^{0.5 \cdot 15}\right) - 2 = -0.011 \geq 0 \rightarrow g_{f,max} = 0$$

$$g_f = \max(15 \cdot e^{-0.86 \cdot 1.49^{0.629}} - 2, 0) \leq g_{f,max}$$

$$g_f = \max(2.97, 0) \leq 0$$

$$g_f = 0 \text{ s}$$

$$n_q = 0.278 \cdot (15 - 2 - 0) \geq 0$$

$$n_q = 3.61 \text{ veh} \geq 0 \rightarrow ok$$

$$E_{L2} = \frac{1 - \left(1 - \frac{23}{52}\right)^{3.61}}{\frac{23}{52}} = 2.14$$

$$s_{sr} \cdot s_{sl2} = s_{th} \cdot \frac{1}{1 + P_R \cdot (E_{R,m} - 1)} \cdot \frac{1}{1 + P_L \cdot \left(\frac{E_{L2}}{f_{Lpb}} - 1\right)}$$

$$= 1347.18 \cdot \frac{1}{1 + \frac{10}{40} \cdot (1.1188 - 1)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{20}{40} \cdot \left(\frac{2.14}{1} - 1\right)} = 833.3 \text{ veh/hora}$$

Conocido el valor del flujo ajustado de saturación podemos calcular la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde. Para ello será necesario definir previamente el tipo de llegada del grupo de carriles y conocer la duración de la fase verde y del ciclo completo de señalización.

Así pues, en el caso que estamos estudiando, podemos considerar que la llegada será tipo 2, pues entre el 40 y el 80 % de los vehículos llegan durante la fase roja a la intersección, en grupos moderadamente densos y provocando colas en prácticamente todos los ciclos. Esto supone que el valor del coeficiente de grupo sea de 0.67 de acuerdo al criterio del HCM, como se puede ver en la tabla 5 del presente TFM.

Por tanto, sabiendo que la duración de la fase verde para este semáforo es de 15 segundos y que el ciclo dura 67 segundos, el valor de la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde será el siguiente:

$$P = R_p \cdot \frac{g}{C} = 0.67 \cdot \frac{15}{67} = 0.15$$

→ El 15 % de los vehículos llega durante la fase verde

Tras haber obtenido los datos anteriores, podemos pasar al cálculo de los retrasos, por lo que comenzaremos calculando la capacidad del carril, como se hizo en el anterior acceso.

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 833.3 \cdot \frac{15}{67} = 186.5 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{40 \cdot \frac{60}{14.52}}{186.5} = 0.886$$

### Retraso uniforme

Los datos necesarios para la construcción de los polígonos de acumulación de colas son los siguientes:

Tabla 23. Datos sobre la señalización. Acceso Oeste. Grupo de carriles 1

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	15
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	49
Duración del ciclo	67

Tabla 24. Datos sobre demanda. Acceso Oeste. Grupo de carriles 1

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	40
Vehículos por ciclo	3,07
Media de vehículos en cola por ciclo	2,46
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	7,38

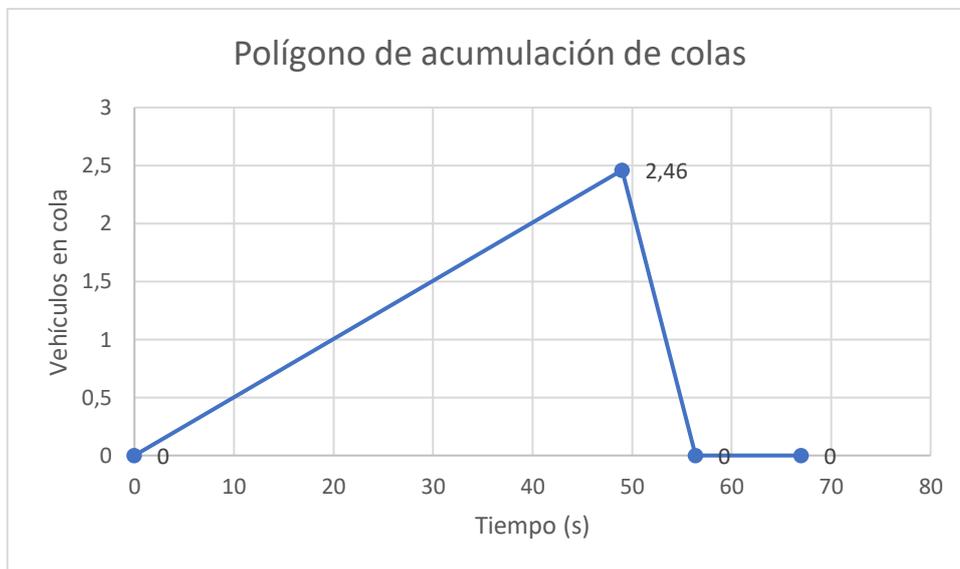


Ilustración 31. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección n°1. Acceso Oeste. Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(49 + 7.38) \cdot 2.26}{2} = 69.35 \text{ segundos}$$

$$\text{Retraso uniforme} = \frac{69.35}{3.07} = 22.59 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso incremental

Por otro lado, debemos calcular el valor del retraso incremental, el cual se obtendrá mediante la aplicación directa de una ecuación en la cual se han de emplear los siguientes valores:

Tabla 25. Datos para retraso incremental. Intersección nº1. Acceso Oeste.

Duración del periodo de análisis (T)	0,242 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,886
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	186,5 veh/h

Siendo el valor del retraso incremental el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.242 \cdot \left[ (0.886 - 1) + \sqrt{(0.886 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.886}{186.5 \cdot 0.242}} \right]$$

$$= 41.06 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del carril compartido del acceso Oeste será de:

$$R = R_u + R_i = 22.59 + 41.06 = 63.65 \text{ segundos/vehículo}$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando tiene un Nivel de Servicio E.

Tabla 26. Resumen resultados. Acceso Oeste. Intersección nº1

RESUMEN ACCESO OESTE	
Retraso (s /veh)	63,65
Ratio Vol - Cap	0,886
Nivel de servicio	NS E

### Estudio del acceso Norte. Avenida de Era Alta

Es el turno de analizar el acceso Norte de la intersección, que como los anteriores accesos permite el movimiento de paso, el giro a derecha y el giro a izquierda, aunque a diferencia de los anteriores accesos, en esta ocasión el giro a derecha está protegido, mientras que

el giro a izquierda está permitido ya que atraviesa el flujo de vehículos de la corriente opuesta y además en este giro también se encuentra un paso de peatones que interfiere a la hora de realizar este movimiento.

De modo que la situación a pie de asfalto es la que se puede ver en la imagen 5.



*Imagen 5. Intersección nº1. Acceso Norte. Fuente: Elaboración propia*

En este caso como en los anteriores, solo hay un grupo de movimiento con un carril compartido que permite hacer los movimientos de paso, giro a izquierda y giro a derecha. La parada de autobús se encuentra fuera de la zona de influencia del acceso y presenta una inclinación del 2 %, los cuales modificarán los factores correctores como se verá a continuación.

### **Grupo de carriles 1. Carril compartido de paso, giro a izquierda y derecha.**

Como en los anteriores accesos tendrá el mismo flujo base de saturación y el mismo factor de ajuste por ancho de carril,  $s_0 = 1750 \text{ veh / h} \cdot \text{carril}$  y  $f_w = 1$ .

Seguimos calculando el factor de ajuste por vehículos pesados, sabiendo que en este carril el porcentaje de vehículos pesados es del 4.62 %.

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_{HV}(E_T - 1)} = \frac{100}{100 + 4.62 \cdot (2 - 1)} = 0.9558$$

Como la inclinación de la rasante es del 2 %.

$$f_g = 1 - \frac{P_g}{200} = 1 - \frac{2}{200} = 0.98$$

En este caso para calcular el factor corrector por maniobras adyacentes, se ha observado que dispone de 8 plazas legales para el aparcamiento en la zona de influencia del acceso en su lateral derecho, que suele tener un ratio de 2 maniobras por hora, y sabiendo que solo se dispone de un solo carril, el factor corrector será el siguiente.

$$f_p = \frac{N - 0.1 - \frac{18 \cdot N_m}{3600}}{N} = \frac{1 - 0.1 - \frac{18 \cdot 2}{3600}}{1} = 0.89$$

Como se menciono anteriormente la parada de autobús se encuentra fuera de la zona de influencia del acceso, por lo que el factor de corrección debido a las paradas de los vehículos de transporte urbano será igual a la unidad.  $f_{bb} = 1$ .

El factor de ajuste por tipo de área y el de ajuste por uso de carril siguen siendo los mismos,  $f_a = 0.9$  y  $f_{LU} = 1$ .

La ecuación para obtener el flujo ajustado de saturación tenemos que modificarla para que se ajuste a las condiciones de este acceso.

$$s_{sr} \cdot s_{sl2} = s_{th} \cdot \frac{1}{1 + P_R \cdot (E_R - 1)} \cdot \frac{1}{1 + P_L \cdot \left( \frac{E_{L2}}{f_{Lpb}} - 1 \right)}$$

La principal diferencia con los anteriores accesos es que en esta ocasión se utiliza  $E_r$  que es el número de vehículos de paso equivalente a cada vehículo que gira a la derecha en fase protegida y es igual a 1.18 y que  $f_{Lpb}$  no será igual a la unidad, ya que en este caso si afecta al giro a izquierda.

Comenzamos por el primer término de la ecuación.

$$\begin{aligned} s_{th} &= s_0 \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} = 1750 \cdot 1 \cdot 0.9558 \cdot 0.98 \cdot 0.89 \cdot 1 \cdot 0.9 \cdot 1 \\ &= 1313 \text{ veh/h} \cdot \text{carril} \end{aligned}$$

La segunda parte de la ecuación ya disponemos de los datos necesarios, por lo que vamos a calcular la tercera parte como en los accesos anteriores.

$$g_p = G_p - l_{1,p} + e_p = 40 - 2 + 2 = 40 \text{ s}$$

$$G_u = D_{p2} - Y_6 - R_{C6} - G_{q2} = 67 - 3 - 24 - 40 = 0$$

$$g_u = 0 + 2 = 2 \text{ s} \leq 40 \rightarrow ok$$

$$LTC = \frac{48 \cdot 67}{3600} = 0.893 \text{ veh/ciclo}$$

$$g_{f,max} = \frac{\left(1 - \frac{12}{47}\right)}{0.5 \cdot \frac{12}{47}} \cdot \left(1 - \left[1 - \frac{12}{47}\right]^{0.5 \cdot 40}\right) - 2 = 3.83 \geq 0 \rightarrow ok$$

$$g_f = \max(40 \cdot e^{-0.86 \cdot 0.893^{0.629}} - 2, 0) \leq g_{f,max}$$

$$g_f = \max(15.95, 0) \leq 3.83$$

$$g_f = 3.83 \text{ s}$$

$$n_q = 0.278 \cdot (40 - 2 - 3.83) \geq 0$$

$$n_q = 9.5 \text{ veh} \geq 0 \rightarrow ok$$

$$E_{L2} = \frac{1 - \left(1 - \frac{8}{56}\right)^{9.5}}{\frac{8}{56}} = 5.38$$

Ahora se calcula  $f_{Lpb}$  de igual manera que se calculó  $f_{Rpb}$  en el acceso Sur, por lo que adoptamos el valor que tenía, que para este caso tomaremos  $f_{Lpb} = A_{pbT} = 0.9907$ , y finalmente podemos ir a sustituir en la ecuación del flujo ajustado de saturación.

$$\begin{aligned} S_{sr} \cdot S_{sl2} &= S_{th} \cdot \frac{1}{1 + P_R \cdot (E_R - 1)} \cdot \frac{1}{1 + P_L \cdot \left(\frac{E_{L2}}{f_{Lpb}} - 1\right)} \\ &= 1313 \cdot \frac{1}{1 + \frac{18}{47} \cdot (1.18 - 1)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{12}{47} \cdot \left(\frac{5.38}{0.9907} - 1\right)} = 576.35 \text{ veh/hora} \end{aligned}$$

Conocido el valor del flujo ajustado de saturación podemos calcular la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde. Para ello será necesario definir previamente el tipo de llegada del grupo de carriles y conocer la duración de la fase verde y del ciclo completo de señalización.

Así pues, en el caso que estamos estudiando, podemos considerar que la llegada será tipo 4, pues entre el 40 y el 80 % de los vehículos llegan durante la fase verde a la

intersección, en grupos moderadamente densos y provocando pocas colas. Esto supone que el valor del coeficiente de grupo sea de 1.33 de acuerdo al criterio del HCM, como se puede ver en la tabla 5 del presente TFM.

Por tanto, sabiendo que la duración de la fase verde para este semáforo es de 40 segundos y que el ciclo dura 67 segundos, el valor de la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde será el siguiente:

$$P = R_p \cdot \frac{g}{C} = 1.33 \cdot \frac{40}{67} = 0.794$$

→ El 79.4 % de los vehículos llega durante la fase verde

Tras haber obtenido los datos anteriores, podemos pasar al cálculo de los retrasos, por lo que comenzaremos calculado la capacidad del carril, como se hizo en los anteriores accesos.

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 576.35 \cdot \frac{40}{67} = 344.09 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{47 \cdot \frac{60}{14.52}}{344.09} = 0.564$$

### Retraso uniforme

Los datos necesarios para la construcción de los polígonos de acumulación de colas son los siguientes:

Tabla 27. Datos sobre la señalización. Acceso Norte. Grupo de carriles 1

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	40
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	24
Duración del ciclo	67

Tabla 28. Datos sobre demanda. Acceso Norte. Grupo de carriles 1

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	47
Vehículos por ciclo	3,62
Media de vehículos en cola por ciclo	1,69
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	5,07

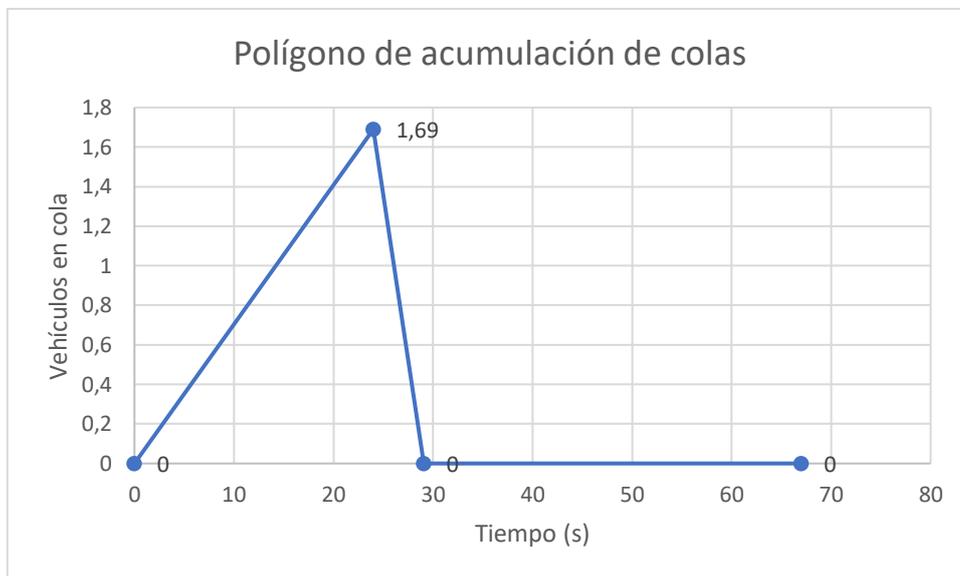


Ilustración 32. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección n°1. Acceso Norte. Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(24 + 5,07) \cdot 1,69}{2} = 24,56 \text{ segundos}$$

$$\text{Retraso uniforme} = \frac{24,56}{3,62} = 6,78 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso incremental

Por otro lado, debemos calcular el valor del retraso incremental, el cual se obtendrá mediante la aplicación directa de una ecuación en la cual se han de emplear los siguientes valores:

Tabla 29. Datos para retraso incremental. Intersección nº1. Acceso Norte

Duración del periodo de análisis (T)	0,242 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,564
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	344,09 veh/h

Siendo el valor del retraso incremental el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.242 \cdot \left[ (0.564 - 1) + \sqrt{(0.564 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.564}{344.09 \cdot 0.242}} \right]$$

$$= 6.54 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del carril compartido del acceso Oeste será de:

$$R = R_u + R_i = 6.78 + 6.54 = 13.32 \text{ segundos/vehículo}$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando tiene un Nivel de Servicio B.

Tabla 30. Resumen resultados. Acceso Norte. Intersección nº1

RESUMEN ACCESO NORTE	
Retraso (s /veh)	13,32
Ratio Vol - Cap	0,564
Nivel de servicio	NS B

### Estudio del acceso Este. Camino Hondo.

Para finalizar la intersección, analizamos el acceso Este, que al igual que en los accesos anteriores su carril permite realizar el movimiento de paso, de giro a izquierda y giro a derecha, y su estructura es exactamente igual que el del acceso Norte, es decir, el giro a

derecha se realiza de forma protegida mientras que el giro a izquierda se ejecuta de forma permitida, además de que el paso de peatones también influye en este movimiento.

De tal manera que la situación a pie de campo es la siguiente.



*Imagen 6. Intersección n°1. Acceso Este. Fuente: Elaboración propia*

De igual modo que en los anteriores accesos, solo hay un grupo de movimiento con un carril compartido que permite realizar el movimiento de paso, el giro a izquierda y el giro a derecha. En este caso tampoco dispone de parada de autobús, ya que este carril lleva por un camino donde es necesario atravesar un paso inferior con un gálibo máximo de 1.80 metros, no posee aparcamientos legales en la zona de influencia de la intersección ni presenta inclinación longitudinal, aunque la calzada es algo más estrecha no afecta al factor de ajuste por ancho de carril.

### **Grupo de carriles 1. Carril compartido de paso, giro a izquierda y derecha.**

Como en los anteriores accesos tendrá el mismo flujo base de saturación y el mismo factor de ajuste por ancho de carril, ya que el ancho medio del carril sigue estando entre los 3 metros y los 3.92 metros, por lo que  $s_0 = 1750 \text{ veh} / \text{h} \cdot \text{carril}$  y  $f_w = 1$ .

Sabiendo que en este carril el porcentaje de vehículos pesados es del 0 % el factor de ajuste por vehículos pesados será igual a la unidad.  $f_{HV} = 1$ .

Como la inclinación de la rasante es del 0 %.  $f_g = 1$ .

Debido a que no existen carriles contiguos para el aparcamiento, por lo tanto, no cabe la posibilidad de que existan bloqueos de carril debido a las maniobras de entrada y salida en los huecos para aparcar, el factor de ajuste por aparcamientos también será unitario.

$$f_p = 1.$$

Al no tener tampoco paradas de autobús en la zona de influencia del acceso, el factor de corrección debido a las paradas de los vehículos de transporte urbano no tendrá relevancia.  $f_{bb} = 1$ .

El factor de ajuste por tipo de área y el de ajuste por uso de carril siguen siendo los mismos,  $f_a = 0.9$  y  $f_{LU} = 1$ .

Las ecuaciones para obtener el flujo ajustado de saturación son las mismas que en el acceso anterior, por lo que pasaremos a sustituir en ellas los valores aforados en este acceso.

$$s_{th} = s_0 \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} = 1750 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.9 \cdot 1 \\ = 1575 \text{ veh/h} \cdot \text{carril}$$

$$g_p = G_p - l_{1,p} + e_p = 15 - 2 + 2 = 15 \text{ s}$$

$$G_u = D_{p2} - Y_6 - R_{C6} - G_{q2} = 67 - 3 - 49 - 15 = 0$$

$$g_u = 0 + 2 = 2 \text{ s} \leq 15 \rightarrow \text{ok}$$

$$LTC = \frac{92 \cdot 67}{3600} = 1.712 \text{ veh/ciclo}$$

$$g_{f,max} = \frac{\left(1 - \frac{23}{52}\right)}{0.5 \cdot \frac{23}{52}} \cdot \left(1 - \left[1 - \frac{23}{52}\right]^{0.5 \cdot 15}\right) - 2 = 0.49 \geq 0 \rightarrow \text{ok}$$

$$g_f = \max(15 \cdot e^{-0.86 \cdot 1.712^{0.629}} - 2, 0) \leq g_{f,max}$$

$$g_f = \max(2.49, 0) \leq 0.49$$

$$g_f = 0.49 \text{ s}$$

$$n_q = 0.278 \cdot (15 - 2 - 0.49) \geq 0$$

$$n_q = 3.48 \text{ veh} \geq 0 \rightarrow \text{ok}$$

$$E_{L2} = \frac{1 - \left(1 - \frac{20}{40}\right)^{3.48}}{\frac{20}{40}} = 1.82$$

Ahora se calcula  $f_{Lpb}$  de igual manera que se calculó  $f_{Rpb}$  en el acceso Oeste, por lo que adoptamos el valor que tenía, que para este caso tomaremos  $f_{Lpb} = A_{pbT} = 0.9702$ , y finalmente podemos ir a sustituir en la ecuación del flujo ajustado de saturación.

$$s_{sr} \cdot s_{sl2} = s_{th} \cdot \frac{1}{1 + P_R \cdot (E_R - 1)} \cdot \frac{1}{1 + P_L \cdot \left(\frac{E_{L2}}{f_{Lpb}} - 1\right)}$$

$$= 1575 \cdot \frac{1}{1 + \frac{18}{52} \cdot (1.18 - 1)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{23}{52} \cdot \left(\frac{1.82}{0.9702} - 1\right)} = 1068.62 \text{ veh/hora}$$

Conocido el valor del flujo ajustado de saturación podemos calcular la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde. Para ello será necesario definir previamente el tipo de llegada del grupo de carriles y conocer la duración de la fase verde y del ciclo completo de señalización.

Así pues, en el caso que estamos estudiando, podemos considerar que la llegada será tipo 2, pues entre el 40 y el 80 % de los vehículos llegan durante la fase roja a la intersección, en grupos moderadamente densos y provocando colas en prácticamente todos los ciclos. Esto supone que el valor del coeficiente de grupo sea de 0.67 de acuerdo al criterio del HCM, como se puede ver en la tabla 5 del presente TFM.

Por tanto, sabiendo que la duración de la fase verde para este semáforo es de 15 segundos y que el ciclo dura 67 segundos, el valor de la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde será el siguiente:

$$P = R_p \cdot \frac{g}{C} = 0.67 \cdot \frac{15}{67} = 0.15$$

→ El 15 % de los vehículos llega durante la fase verde

Tras haber obtenido los datos anteriores, podemos pasar al cálculo de los retrasos, por lo que comenzaremos calculado la capacidad del carril, como se hizo en el anterior acceso.

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 1068.62 \cdot \frac{15}{67} = 239.24 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{52 \cdot \frac{60}{14.52}}{239.24} = 0.898$$

### Retraso uniforme

Los datos necesarios para la construcción de los polígonos de acumulación de colas son los siguientes:

Tabla 31. Datos sobre la señalización. Acceso Este. Grupo de carriles 1

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	15
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	49
Duración del ciclo	67

Tabla 32. Datos sobre demanda. Acceso Este. Grupo de carriles 1

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	52
Vehículos por ciclo	4
Media de vehículos en cola por ciclo	3,31
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	9,93

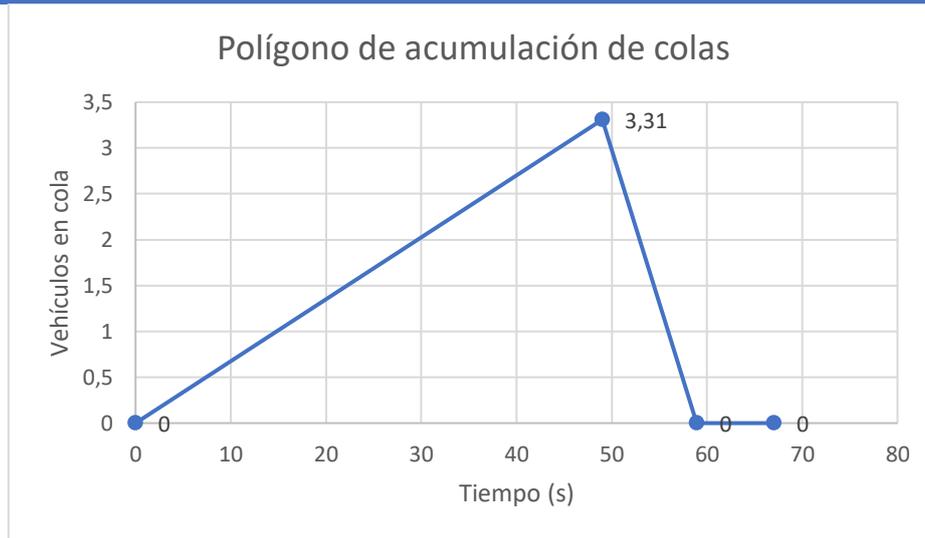


Ilustración 33. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº1. Acceso Este. Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(49 + 9.93) \cdot 3.31}{2} = 97.53 \text{ segundos}$$

$$\text{Retraso uniforme} = \frac{97.53}{4} = 24.38 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso incremental

Por otro lado, debemos calcular el valor del retraso incremental, el cual se obtendrá mediante la aplicación directa de una ecuación en la cual se han de emplear los siguientes valores:

Tabla 33. Datos para retraso incremental. Intersección nº1. Acceso Este

Duración del periodo de análisis (T)	0,242 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,898
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	239,24 veh/h

Siendo el valor del retraso incremental el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.242 \cdot \left[ (0.898 - 1) + \sqrt{(0.898 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.898}{239.24 \cdot 0.242}} \right]$$

$$= 36.4 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del carril compartido del acceso Oeste será de:

$$R = R_u + R_i = 24.38 + 36.4 = 60.78 \text{ segundos/vehículo}$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando tiene un Nivel de Servicio E.

Tabla 34. Resumen resultados. Acceso Este. Intersección nº1

RESUMEN ACCESO ESTE	
Retraso (s /veh)	60,78
Ratio Vol - Cap	0,898
Nivel de servicio	NS E

### Estudio conjunto de la intersección nº1.

Para concluir con el análisis de la primera intersección, se puede realizar un estudio conjunto de todos los accesos de la misma. El HCM propone 3 tipos de procedimientos o hipótesis las cuales veremos a continuación.

**Procedimiento 1:** Se fija el peor nivel de servicio de todos los carriles observados individualmente. De este modo, el resultado sería que la intersección estaría actuando bajo un **NS E**, ya que dos de sus accesos poseen dicho nivel de servicio con un retraso equivalente de 60.78 y 63.65 segundos por vehículo en los accesos Este y Oeste respectivamente.

**Procedimiento 2:** Se realiza una media aritmética de los retrasos de todos los grupos de carriles estudiados, el valor obtenido para la intersección globalmente sería el siguiente.

Tabla 35. Retraso medio. Intersección n°1

Retraso del Acceso Sur - Carril compartido	6,33	seg/veh
Retraso del Acceso Norte - Carril compartido	13,32	seg/veh
Retraso del Acceso Este - Carril compartido	60,78	seg/veh
Retraso del Acceso Oeste - Carril compartido	63,65	seg/veh
Retraso medio	<b>36,02</b>	<b>seg/veh</b>
<b>Nivel de servicio de la intersección</b>	<b>NS D</b>	

**Procedimiento 3:** Este procedimiento se corresponde con el modo recomendado por el HCM, el cual consiste en calcular el nivel de servicio de la intersección mediante la realización de una media del retraso producido en cada uno de los grupos de carriles, ponderada por el volumen de usuarios de dicho carril. De este modo, el nivel de servicio global de la intersección sería el siguiente.

Tabla 36. Retraso ponderado. Intersección n°1

	Retraso (seg/veh)	Volumen (veh)
Retraso del Acceso Sur - Carril compartido	6,33	56
Retraso del Acceso Norte - Carril compartido	13,32	47
Retraso del Acceso Este - Carril compartido	60,78	52
Retraso del Acceso Oeste - Carril compartido	63,65	40
Retraso ponderado	<b>34,29</b>	
<b>Nivel de servicio de la intersección</b>	<b>NS C</b>	

### Conclusiones sobre la intersección n°1

Tras el estudio de la intersección n°1 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La principal deficiencia de esta intersección es que fue ideada para que la corriente principal, es decir, la calle Mayor y la avenida de Era Alta tuviera mucho mayor volumen de tráfico que la corriente opuesta, pero no pensaron que en mediante estos accesos se llegaría al centro de enseñanza que hay en las cercanía y en las horas de mayor tráfico, como son las horas de entrada y salida de dicho colegio, estos 2 accesos están al borde de la saturación y se producen grandes retrasos como se ha comprobado en este estudio, sobrepasando el minuto de retraso por vehículo que accede por la calle Dr. Tomás Pellicer Frutos y por el Camino Hondo. Por tanto, esta intersección es un claro ejemplo de que se puede optimizar la intersección mediante el uso de controladores accionados por el tráfico, que durante las horas de mayor densidad, pueda cambiar los tiempos de las fases de

los semáforos para adaptarse mejor a la situación en la que se encuentra la intersección.

- Hay un gran desequilibrio entre los accesos Norte – Sur y Este – Oeste, ya que el primero disfruta de casi el triple de fase verde en su señalización que los segundos, que, aunque en ciertas horas del día puede funcionar de manera adecuada, hay fases del día donde penaliza mucho a los vehículos que acceden por la calle Dr. Tomás Pellicer Frutos y por el Camino Hondo.

## **4.2. INTERSECCIÓN N°2. AV. CIUDAD DE ALMERÍA CON CARRIL CASCALES**

### **4.2.1. Introducción**

La segunda intersección analizada en este TFM es la formada por la Av. Ciudad de Almería y el Carril Cascales, situada entre el municipio de Alcantarilla, con una población de 41.155 habitantes según el INE 2016 y Murcia, con una población de 441.003 habitantes según la misma fuente. Esta intersección se encuentra en la principal vía de acceso de muchas pedanías como la Puebla de soto, La raya o Rincón de seca hacia la ciudad de Murcia.



*Imagen 7. Vista aérea de la intersección nº2. Fuente: Google Earth*

Esta intersección tiene la peculiaridad de que se trata de una intersección en T, donde el Carril Cascales se cruza con la Av. Ciudad de Almería, permitiendo realizar el giro a izquierda hacia la zona Este o girar a la derecha hacia el Oeste. Se ha escogido esta intersección porque se piensa que el Carril Cascales tiene muy poco tráfico e interrumpe constantemente el flujo de vehículos que circula por la Av. Ciudad de Almería cuando por este carril no hay nadie esperando para realizar el cruce.

Una vez se han conocido los motivos que han llevado a la elección de esta intersección como objeto de estudio, se procede a explicar en detalle los aspectos característicos de cada una de las ramas en relación a la distribución de carriles:

- Desde el acceso Este (Av. Ciudad de Almería) discurren 2 carriles, a la derecha un carril compartido que permite realizar el movimiento de paso y el giro protegido a derecha, y a su izquierda un carril exclusivo de paso para continuar por la avenida. Además, hay una para de autobús en la zona de influencia de la intersección, pero como dispone de una zona exclusiva para su parada no se tendrá en cuenta a la hora de realizar el estudio de este acceso
- En el acceso Oeste (Av. Ciudad de Almería) hay 2 carriles, los cuales permiten exclusivamente el movimiento de paso para seguir por la misma avenida.

- En el acceso Norte (Carril Cascales) se sitúa un solo carril, que permite realizar el giro a derecha permitido, ya que se encuentra un paso de peatones que obstaculiza este movimiento, y el giro a izquierda protegido

Así, el croquis diseñado para la toma de datos en la intersección representa la distribución de carriles expuesta en los párrafos anteriores con exactitud, correspondiente con la siguiente ilustración.

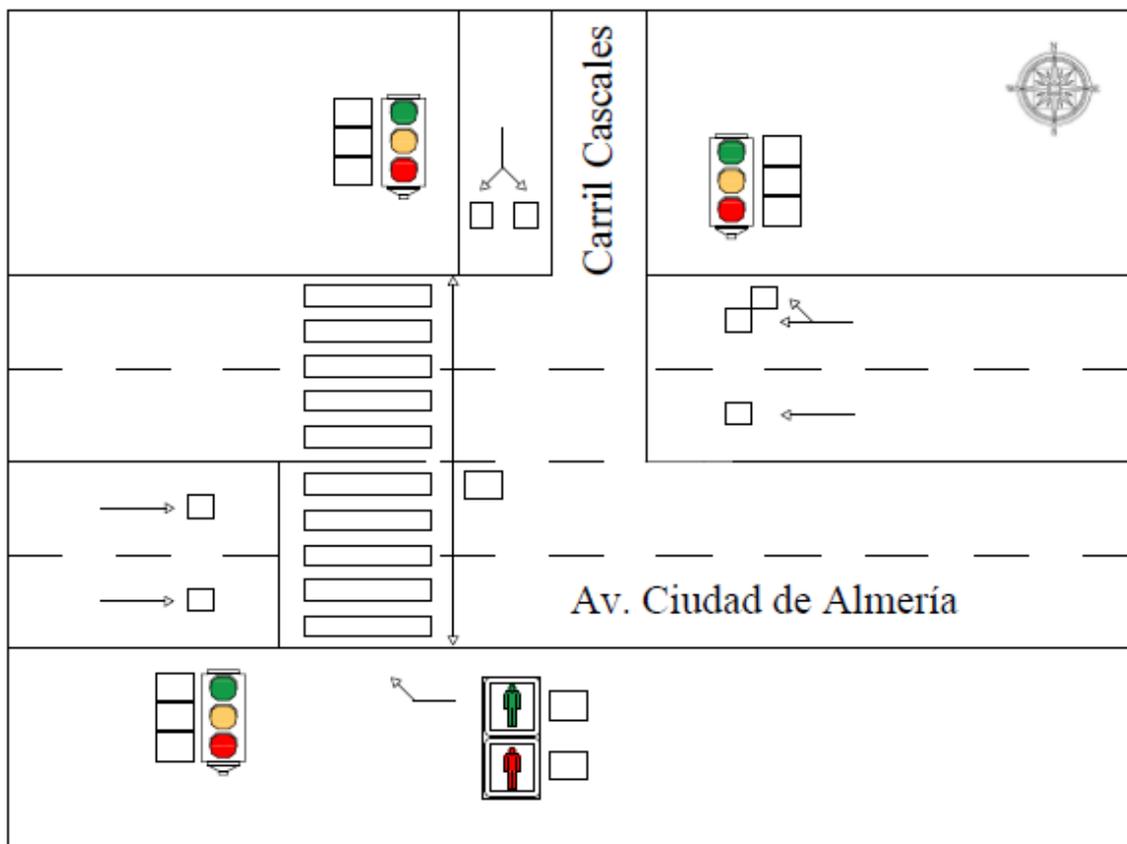


Ilustración 34. Croquis intersección nº2. Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2. Herramientas empleadas para el cálculo

De igual modo que en la intersección nº1, para facilitar la toma de datos se han elaborado diversas planillas y se ha dividido el ciclo de señalización en 2 fases, tomadas por 2 aforadores, las cuales se desarrollan a continuación.

- Fase 1: Paso desde los accesos Este y Oeste por la avenida Ciudad de Almería. En esta fase el semáforo se muestra verde para los vehículos que acceden por el Este que disponen de un carril que les permite el movimiento de paso y el de giro a derecha al carril Cascales y otro por el cual continúan por la avenida Ciudad de

Almería. Mientras que por el acceso Oeste los dos carriles de los que dispone sólo permiten realizar el movimiento de paso, como puede verse en la ilustración 29. La duración del verde es de 108 segundos, mientras que la del ámbar es de 3 segundos y la de rojo de 29 segundos.

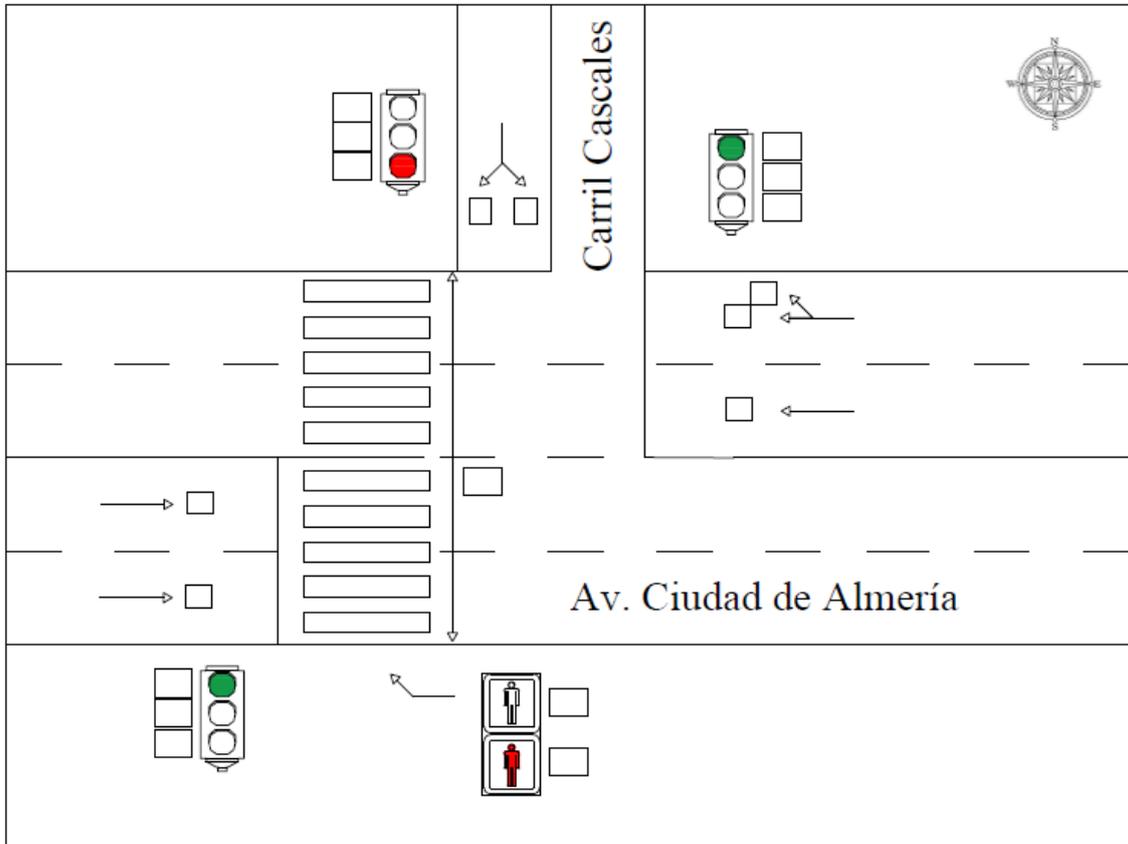


Ilustración 35. Fase 1 de la intersección n.º 2. Fuente: Elaboración propia

- Fase 2: Paso de los vehículos desde el acceso Norte, que permite el giro a derecha permitido debido al paso de peatones y el giro a izquierda protegido. Además, se realiza el movimiento de paso por el paso de peatones, véase la ilustración 30. La duración del verde es de 20 segundos, la del ámbar de 3 segundos y la de rojo de 117 segundos.

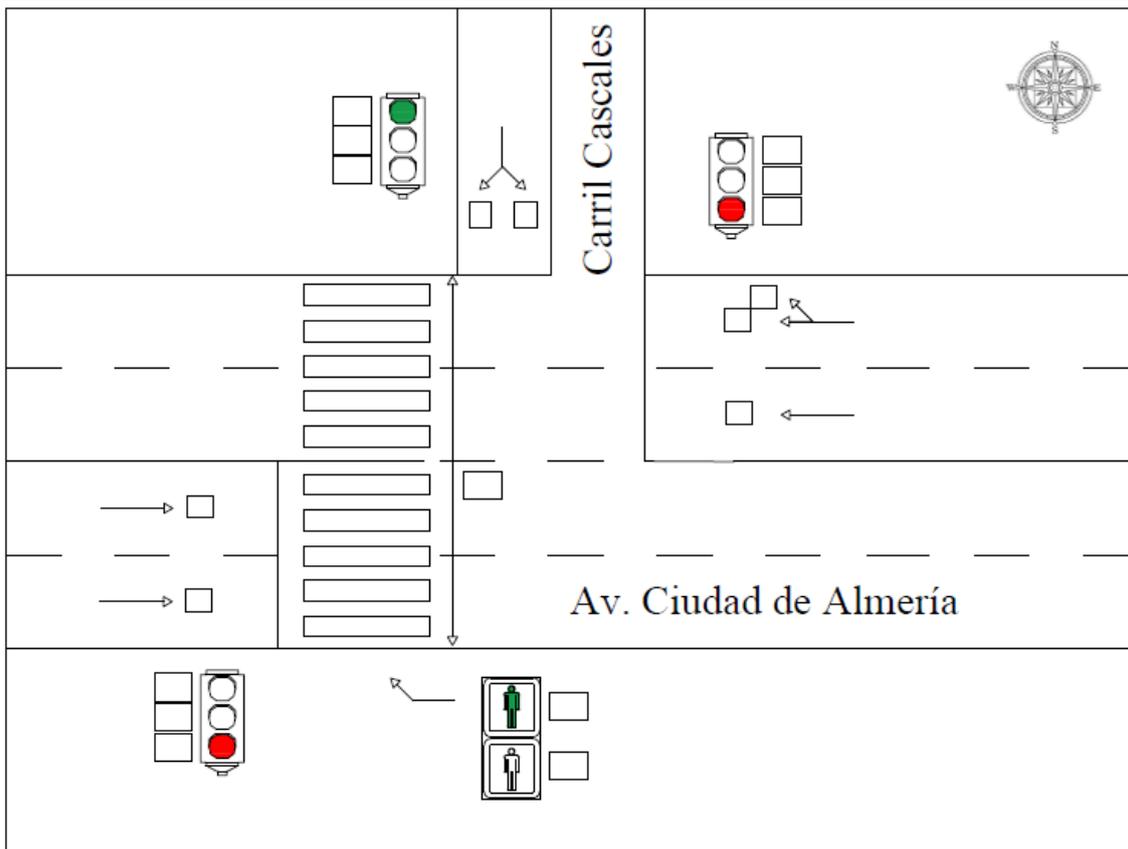


Ilustración 36. Fase 2 de la intersección nº2. Fuente: Elaboración propia

Las planillas empleadas para la recolección de datos se presentan a continuación, comenzando por la que se desarrolló para la duración de las fases.

Tabla 37. Planilla para determinación de fases. Fuente: Elaboración propia

	Planilla duración del ciclo (s)		
	Verde	Ámbar	Rojo
Fase 1			
Fase 2			

Por otro lado, las planillas empleadas para plasmar el aforo de los vehículos fueron las que se muestran a continuación, teniendo en cuenta que se realizó un análisis aproximado de 15 minutos, dado que el ciclo total era de 140 segundos, se realizaron 6 ciclos completos que tuvieron una duración total de 14 minutos.

Tabla 38. Planilla de aforo 1. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Este - Grupo 1 (Av. Ciudad de Almería) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
Total								

Tabla 39. Planilla de aforo 2. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Este - Grupo 2 (Av. Ciudad de Almería) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
Total								

Tabla 40. Planilla de aforo 3. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Oeste - Grupo 1 (Av. Ciudad de Almería) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
Total								

Tabla 41. Planilla de aforo 4. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Norte - Grupo 1 (Calle Cascales) fase 2								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
Total								

### 4.2.3. Datos obtenidos durante el aforo

Conocidas las distintas herramientas de trabajo empleadas para el estudio de la intersección nº2 se pueden mostrar los resultados obtenidos para el periodo de estudio

escogido, que en este caso corresponde al intervalo entre las 8:15 y las 8:30 del jueves 17 de mayo de 2018.

La elección de esta franja horaria es debido al hecho de que al tratarse de una intersección formada por una gran avenida que comunica varias localidades y da acceso al centro de la ciudad con un carril poco transitado que da acceso a dicha avenida, el tráfico es mas elevado en las horas previas a la entrada de los trabajadores, aunque ocurre lo contrario con los peatones, ya que sobre esas horas no hay un gran flujo de viandantes.

En cuanto al día de la semana, como en la intersección anterior, se ha escogido un día laborable donde el tráfico rodado es mucho mayor.

Así, los datos obtenidos para la duración de las diferentes fases de las que se componen los ciclos son los mostrados e la tabla 42.

*Tabla 42. Fases de señalización de la intersección nº2. Fuente: Elaboración propia*

	Planilla duración del ciclo (s)		
	Verde	Ámbar	Rojo
Fase 1	108	3	29
Fase 2	20	3	117

En la tabla 43 se puede observar como ya se dijo al principio del presente apartado, que la duración del ciclo completo es de 140 segundos, registrándose 2 fases, una de las cuales combina el movimiento de vehículos con los de peatones, mientras que la otra sólo admite el movimiento del tráfico rodado. Entre estas fases destaca la larga duración de la fase verde de la fase 1, ya que al tratarse de una gran avenida se espera mucho más tráfico que en el carril que accede a ella, y aunque puede parecer que la fase roja de 29 segundos esta bien ajustada, al haber tan poco tráfico en el carril que la interseca, esta fase lo único que hará es retrasar a los vehículos que circulan por la avenida como veremos en las siguientes tablas. Sin embargo, esta suposición deberá ser corroborada con el análisis posterior.

Una vez expuestos los datos referentes a la duración de las fases se presentan los obtenidos al llevar a cabo los aforos de tráfico, correspondientes con las siguientes tablas.

Análisis y mejora de intersecciones semaforizadas en Murcia mediante el control semafórico actuado por vehículos.

Tabla 43. Datos planilla de aforo 1. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Este - Grupo 1 (Av. Ciudad de Almería) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	0	6	0	0	1	6	16,67	0
2	0	6	0	0	1	6	16,67	0
3	0	4	0	0	2	4	50,00	0
4	0	3	0	1	0	3	0,00	0
5	0	7	1	1	3	8	37,50	0
6	0	7	0	0	2	7	28,57	0
Total	0	33	1	2	9	34	24,90	0

Tabla 44. Datos planilla de aforo 2. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Este - Grupo 2 (Av. Ciudad de Almería) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	0	11	0	0	0	11	0,00	0
2	0	9	0	0	0	9	0,00	0
3	0	7	0	0	0	7	0,00	0
4	0	14	0	2	0	14	0,00	0
5	0	16	0	0	0	16	0,00	0
6	0	21	0	0	0	21	0,00	0
Total	0	78	0	2	0	78	0,00	0

Tabla 45. Datos planilla de aforo 3. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Oeste - Grupo 1 (Av. Ciudad de Almería) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	0	27	0	12	2	27	7,41	0
2	0	24	0	10	1	24	4,17	0
3	0	26	0	4	0	26	0,00	0
4	0	27	0	13	1	27	3,70	0
5	0	25	0	14	2	25	8,00	0
6	0	16	0	14	3	16	18,75	0
Total	0	145	0	67	9	145	7,00	0

Tabla 46. Datos planilla de aforo 4. Intersección 2. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Norte - Grupo 1 (Calle Cascales) fase 2								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	0	0	0	0	0	0	0,00	0
2	1	0	0	0	0	1	0,00	0
3	0	0	0	0	0	0	0,00	0
4	0	0	0	0	0	0	0,00	0
5	0	0	0	0	0	0	0,00	0
6	1	0	0	1	0	1	0,00	0
Total	2	0	0	1	0	2	0,00	0

Hay que destacar que en la fase 2, a la vez que se producía el paso de los vehículos desde el acceso Norte, también se producía el paso de peatones, y no se registró ni un solo

peatón durante el periodo registrado, hecho que se tendrá en cuenta a la hora de hacer el estudio de la intersección.

Como en la intersección anterior se ha elaborado un croquis simplificado que resume los datos mostrados en las tablas 43, 44, 45 y 46.

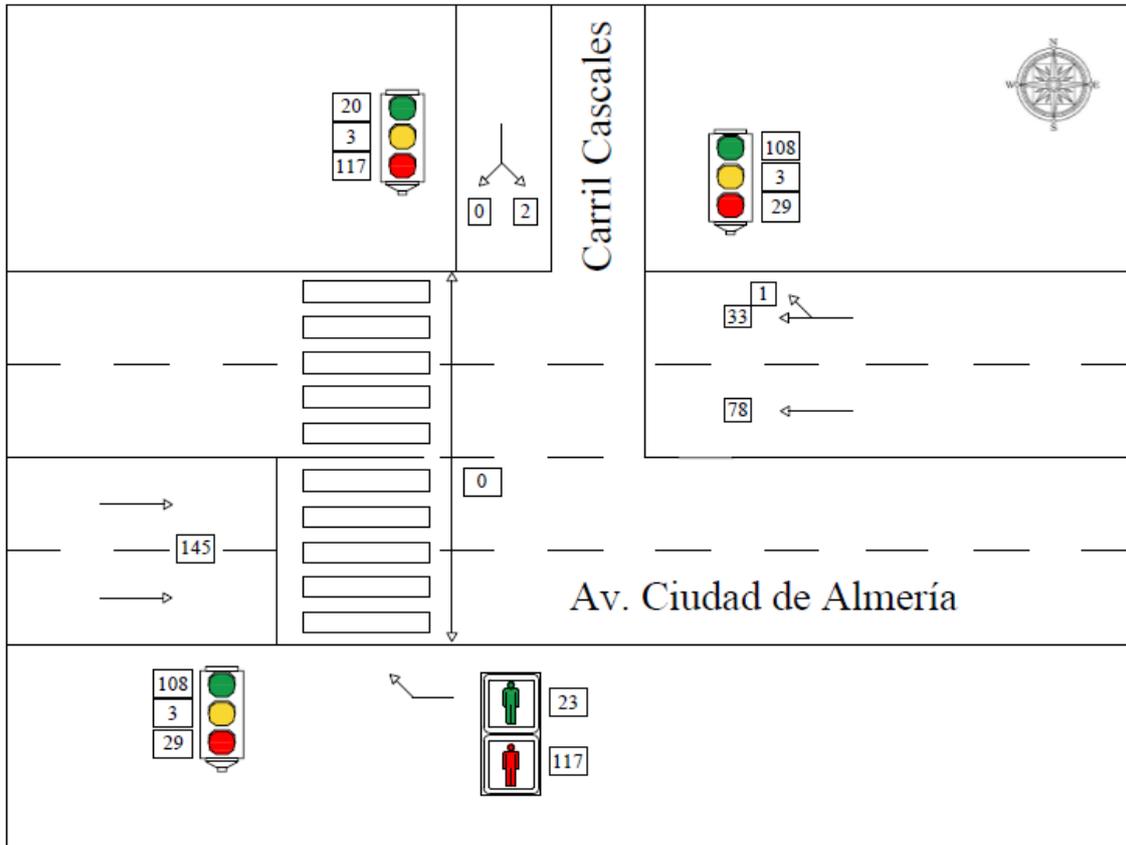


Ilustración 37. Croquis completo intersección nº2. Fuente: Elaboración propia

Los datos mostrados en el croquis son los siguientes:

- Junto a cada una de las flechas que representan los movimientos permitidos, el volumen de vehículos registrados para dicho movimiento. Es importante tener en cuenta que en los carriles compartidos se muestran los valores de ambos movimientos, como por ejemplo, en el carril compartido del acceso Este, el valor de 1 corresponde con los vehículos que realizan el giro a derecha y 33 el que realizan el movimiento de paso.
- Junto a cada semáforo se muestran los valores de la duración de cada una de las fases, es decir, la verde, ámbar y roja, tanto para los de los vehículos como los de peatones que se encuentran referenciados mediante una flecha.

- Por último, junto a cada uno de los pasos de peatones se muestra el dato registrado referente al volumen de peatones que cruzaron en el periodo de estudio en ambas direcciones.

#### **4.2.4. Aplicación del método del HCM a la intersección nº2.**

Al igual que en la intersección número uno, el primer paso a realizar para llevar a cabo la aplicación del método propuesto por el HCM es la determinación de los diversos grupos de carriles y de movimientos que podemos observar en la intersección. Por ello, es importante recordar los criterios que se emplean para determinar dichos conceptos.

Determinaremos como grupo de movimiento los siguientes casos:

- Un movimiento de giro que sea servido por uno o más carriles exclusivos debe ser designado como un grupo de movimiento.
- Los carriles no asignados a un grupo por la regla anterior han de combinarse en un grupo de movimiento.

Por otro lado, para diferenciar los grupos de carriles emplearemos los siguientes criterios:

- Uno o más carriles exclusivos de giro a la izquierda o de giro a la derecha deben designarse como un grupo de carriles.
- Los carriles compartidos deben designarse como un grupo.
- Los carriles que no sean compartidos o exclusivos de giro han de combinarse en un único grupo.

Así, conocido lo anterior, se procede a estudiar la intersección por accesos.

#### **Estudio del acceso Este. Av. Ciudad de Almería**

Se analizará en primer lugar el acceso Este de la intersección, cuya visión a ras de suelo es la siguiente.



*Ilustración 38. Intersección nº2. Acceso Este. Fuente: Elaboración propia*

Como puede observarse en la ilustración 38, en este acceso hay 2 grupos de carriles, uno de ellos está formado por un carril compartido que permite el movimiento de paso y el giro a derecha protegido, mientras que el otro grupo de carriles está formado por un carril que sólo permite el realizar el movimiento de paso.

### **Grupo de carriles 1. Carril compartido de paso y giro a derecha protegido.**

Al igual que en los casos anteriores, comenzamos obteniendo el flujo base de saturación y los factores correctores.

Así, en primer lugar, fijaremos el flujo base de saturación, que en este caso como la intersección se encuentra en una zona con una población mayor de 250.000 habitantes el valor que debemos utilizar según el HCM es:

$$s_0 = 1900 \frac{veh}{h \cdot carril}$$

Continuamos con el mismo factor de ajuste por ancho de carril  $f_w = 1$ .

Seguido del factor de ajuste por vehículos pesados, que sabiendo que en este carril el porcentaje de vehículos pesados es del 24.9 %.

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_{HV}(E_T - 1)} = \frac{100}{100 + 24.9 \cdot (2 - 1)} = 0.8$$

Como la inclinación de la rasante es del 0 %.

$$f_g = 1 - \frac{P_g}{200} = 1 - \frac{0}{200} = 1$$

Sabiendo que no hay plazas de aparcamiento en la zona de influencia de la intersección.

$$f_p = 1$$

Por otro lado, como no hay ninguna parada de autobús en la zona de influencia de la intersección el factor de corrección debido a las paradas de los vehículos de transporte urbano será unitario.  $f_{bb} = 1$ .

El factor de ajuste por tipo de área y el de ajuste por uso de carril siguen siendo los mismos,  $f_a = 0.9$  y  $f_{LU} = 1$ .

En este caso el HCM añade un factor más para tener en cuenta el movimiento de giro a derecha en fase protegida.

$$f_{RT} = \frac{1}{E_R} = \frac{1}{1.18} = 0.8474$$

Donde:

- $E_R$ : Número de vehículos de paso equivalente a cada vehículo que gira a la derecha en fase protegida = 1.18.

Una vez tenemos los factores de corrección comenzamos a calcular el flujo de saturación de la misma manera que el acceso anterior.

$$\begin{aligned} s_{th} &= s_0 \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} \cdot f_{RT} \\ &= 1900 \cdot 1 \cdot 0.8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.9 \cdot 1 \cdot 0.8474 = \\ &= 1159.24 \frac{veh}{h \cdot carril} \end{aligned}$$

Conocido el valor del flujo ajustado de saturación podemos calcular la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde. Para ello será necesario definir previamente el tipo de llegada del grupo de carriles y conocer la duración de la fase verde y del ciclo completo de señalización.

Así pues, en este caso, podemos considerar que la llegada será de tipo 5, ya que más del 80 % del volumen de tráfico llega al comienzo de la fase verde, teniendo una señalización muy favorable en la dirección de estudio y un número de entradas en la otra calle muy escaso.

Por tanto, sabiendo que la duración de la fase verde para este semáforo es de 108 segundos y que el ciclo dura 140 segundos, el valor de la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde será el siguiente:

$$P = R_p \cdot \frac{g}{C} = 1.67 \cdot \frac{108}{140} = 1.28$$

→ Más del 80 % de los vehículos llega durante la fase verde

Tras haber obtenido los datos anteriores, podemos pasar al cálculo de los retrasos, por lo que comenzaremos calculando la capacidad del carril, como se hizo en la anterior intersección.

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 1159.24 \cdot \frac{108}{140} = 894.27 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{34 \cdot \frac{60}{14}}{894.27} = 0.163$$

### Retraso uniforme

Los datos necesarios para la construcción de los polígonos de acumulación de colas son los de la tabla 47 y 48.

Tabla 47. Datos sobre la señalización. Acceso Este. Grupo de carriles 1

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	108
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	29
Duración del ciclo	140

Tabla 48. Datos sobre demanda. Acceso Este. Grupo de carriles 1

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	34
Vehículos por ciclo	5,67
Media de vehículos en cola por ciclo	0,33
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	0,99

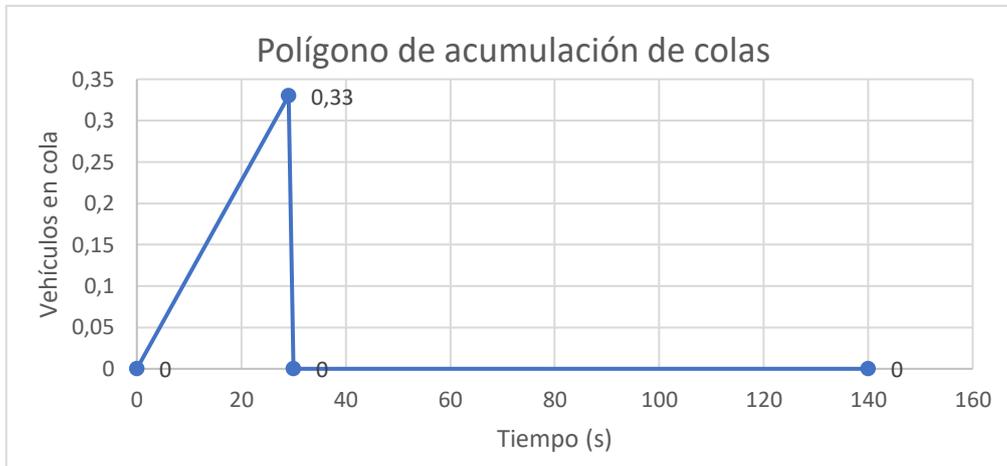


Ilustración 39. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº2. Acceso Este. Grupo de carriles 1. Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(29 + 0,99) \cdot 0,33}{2} = 4,95 \text{ segundos}$$

$$\text{Retraso uniforme} = \frac{4,95}{5,67} = 0,87 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso incremental

Por otro lado, debemos calcular el valor del retraso incremental, el cual se obtendrá mediante la aplicación directa de una ecuación en la cual se han de emplear los siguientes valores:

Tabla 49. Datos para retraso incremental. Intersección nº2. Grupo de carriles 1. Acceso Este

Duración del periodo de análisis (T)	0,2333 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,163
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	894,27 veh/h

Siendo el valor del retraso incremental el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.2333 \cdot \left[ (0.163 - 1) + \sqrt{(0.163 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.163}{894.27 \cdot 0.2333}} \right]$$

$$= 0.39 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del carril compartido del acceso Este será de:

$$R = R_u + R_i = 0.87 + 0.39 = 1.26 \text{ segundos/vehículo}$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando presenta un Nivel de Servicio A.

Tabla 50. Resumen resultados. Acceso Este. Grupo 1. Intersección nº2

RESUMEN ACCESO ESTE GRUPO 1	
Retraso (s /veh)	1,26
Ratio Vol - Cap	0,163
Nivel de servicio	NS A

### Grupo de carriles 2. Carril exclusivo de paso.

El segundo grupo de carriles del acceso Este es el que conforma el carril exclusivo de paso, por lo tanto, desde él sólo se podrá realizar el movimiento de paso para seguir por la avenida ciudad de Almería en dirección Oeste.

Como en el anterior carril el flujo de saturación base es de:

$$s_0 = 1900 \frac{veh}{h \cdot carril}$$

Al tener las mismas medidas que el carril anterior sigue teniendo el mismo factor de ajuste por ancho de carril  $f_w = 1$ .

En este carril no se registró ningún vehículo pesado por lo que el factor de ajuste por vehículos pesados  $f_{HV} = 1$ .

La inclinación de la rasante sigue siendo nula por lo que  $f_g = 1$ .

Tampoco dispone de plazas de aparcamiento en la zona de influencia de la intersección, lo cual hace que tenga un factor de corrección debido a las paradas de vehículos de transporte urbano  $f_{bb} = 1$ .

El factor de ajuste por tipo de área y el de ajuste por uso de carril siguen siendo los mismos,  $f_a = 0.9$  y  $f_{LU} = 1$ .

Una vez tenemos los factores de corrección comentamos a calcular el flujo de saturación de la misma manera que el carril anterior, exceptuando que en este caso no hay que añadir el factor de corrección para tener en cuenta el giro a derecha en fase protegida desde un carril compartido.

$$s_{th} = s_0 \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} = 1900 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.9 \cdot 1 =$$

$$= 1710 \frac{veh}{h \cdot carril}$$

Como en el caso del grupo de carriles 1, podemos considerar que la llegada será de tipo 5, ya que más del 80 % del volumen de tráfico llega al comienzo de la fase verde, teniendo una señalización muy favorable en la dirección de estudio y un número de entradas en la otra calle muy escaso.

Tras haber obtenido los datos anteriores, podemos pasar al cálculo de los retrasos, por lo que comenzaremos calculado la capacidad del carril, como se hizo en el anterior carril.

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 1710 \cdot \frac{108}{140} = 1319.14 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{78 \cdot \frac{60}{14}}{1319.14} = 0.253$$

### Retraso uniforme

Los datos necesarios para la construcción de los polígonos de acumulación de colas son los siguientes:

Tabla 51. Datos sobre la señalización. Acceso Este. Grupo de carriles 2

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	108
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	29
Duración del ciclo	140

Tabla 52. Datos sobre demanda. Acceso Este. Grupo de carriles 2

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	78
Vehículos por ciclo	13
Media de vehículos en cola por ciclo	0,33
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	0,99

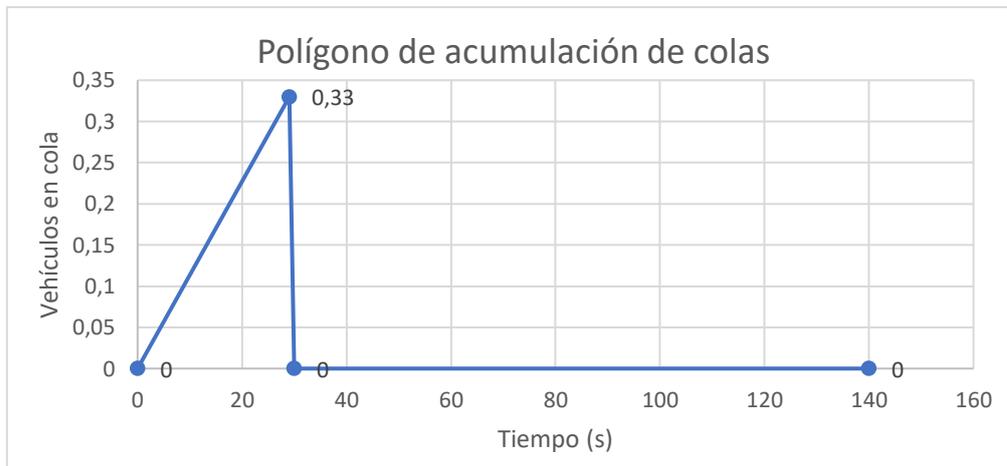


Ilustración 40. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº2. Acceso Este. Grupo de carriles 2. Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(29 + 0,99) \cdot 0,33}{2} = 4,95 \text{ segundos}$$

$$\text{Retraso uniforme} = \frac{4,95}{13} = 0,38 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso incremental

Por otro lado, debemos calcular el valor del retraso incremental, el cual se obtendrá mediante la aplicación directa de una ecuación en la cual se han de emplear los valores de la tabla 53.

Tabla 53. Datos para retraso incremental. Intersección nº2. Grupo de carriles 2. Acceso Este

Duración del periodo de análisis (T)	0,2333 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,253
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	1319,14 veh/h

Siendo el valor del retraso incremental el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.2333 \cdot \left[ (0.253 - 1) + \sqrt{(0.253 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.253}{1319.14 \cdot 0.2333}} \right]$$

$$= 0.46 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del carril compartido del acceso Este será de:

$$R = R_u + R_i = 0.38 + 0.46 = 0.84 \text{ segundos/vehículo}$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando presenta un Nivel de Servicio A.

Tabla 54. Resumen resultados. Acceso Este. Grupo 2. Intersección nº2

RESUMEN ACCESO ESTE GRUPO 2	
Retraso (s /veh)	0,84
Ratio Vol - Cap	0,253
Nivel de servicio	NS A

### Estudio del acceso Oeste. Av. Ciudad de Almería

Continuamos con el acceso Oeste de la intersección, en este caso dispone de 2 carriles que sólo permiten el movimiento de paso en dirección Este para continuar por la avenida

ciudad de Almería como se puede ver en la ilustración 41, ambos carriles forman un único grupo de carriles, por lo tanto, serán analizados conjuntamente.



*Ilustración 41. Intersección nº2. Acceso Oeste. Fuente: Elaboración propia*

Como en el acceso Este, posee el mismo flujo base de saturación.

$$s_0 = 1900 \frac{veh}{h \cdot carril}$$

Además, de los mismos factores de corrección, el de ajuste por ancho de carril  $f_w = 1$ , por inclinación de la rasante  $f_g = 1$ , el de aparcamiento  $f_p = 1$ , el de paradas debido a los vehículos de transporte urbano  $f_{bb} = 1$  y los de tipo de área y uso del carril  $f_a = 0.9$  y  $f_{LU} = 1$ .

Siendo el único factor que varía el factor de ajuste por vehículos pesados, que sabiendo que este grupo de carriles el porcentaje de vehículos pesados es del 7 %.

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_{HV}(E_T - 1)} = \frac{100}{100 + 7 \cdot (2 - 1)} = 0.9345$$

Una vez tenemos los factores de corrección comenzamos a calcular el flujo de saturación de la misma manera que el grupo de carriles 2 del acceso Este.

$$\begin{aligned} s_{th} &= s_0 \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} = 1900 \cdot 1 \cdot 0.9345 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.9 \cdot 1 = \\ &= 1598 \frac{veh}{h \cdot carril} \end{aligned}$$

Como en el acceso Este, podemos considerar que la llegada será de tipo 5, ya que más del 80 % del volumen de tráfico llega al comienzo de la fase verde, teniendo una señalización muy favorable en la dirección de estudio y un número de entradas en la otra calle muy escaso.

Tras haber obtenido los datos anteriores, podemos pasar al cálculo de los retrasos, por lo que comenzaremos calculando la capacidad del carril, como se hizo en los anteriores casos.

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 1598 \cdot \frac{108}{140} = 1232.74 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{145 \cdot \frac{60}{14}}{1232.74} = 0.504$$

### Retraso uniforme

Los datos necesarios para la construcción de los polígonos de acumulación de colas son los mostrados en las tablas 55 y 56.

Tabla 55. Datos sobre la señalización. Acceso Oeste

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	108
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	29
Duración del ciclo	140

Tabla 56. Datos sobre demanda. Acceso Oeste

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	145
Vehículos por ciclo	24,17
Media de vehículos en cola por ciclo	11,17
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	15

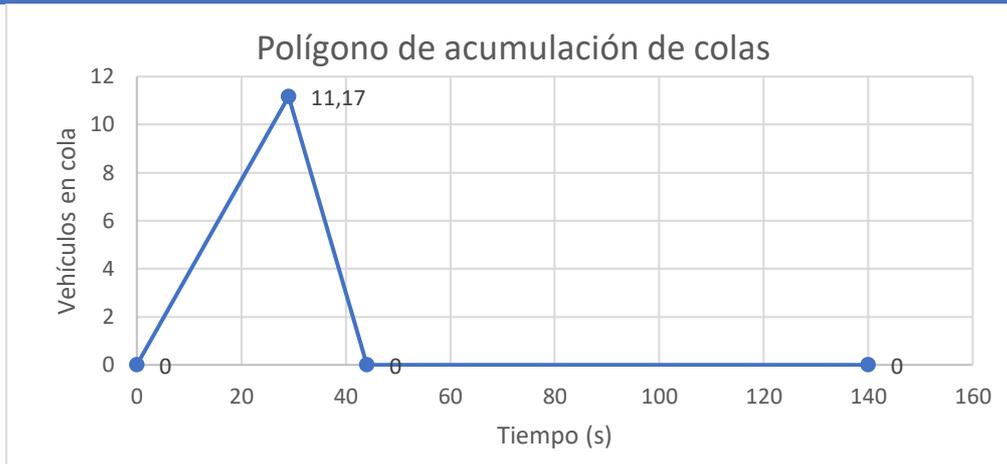


Ilustración 42. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección n°2. Acceso Oeste. Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(29 + 15) \cdot 11,17}{2} = 245,74 \text{ segundos}$$

$$\text{Retraso uniforme} = \frac{245,74}{24,17} = 10,17 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso incremental

Por otro lado, debemos calcular el valor del retraso incremental, el cual se obtendrá mediante la aplicación directa de una ecuación en la cual se han de emplear los siguientes valores:

Tabla 57. Datos para retraso incremental. Intersección n°2. Acceso Oeste

Duración del periodo de análisis (T)	0,2333 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,504
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	1232,74 veh/h

Siendo el valor del retraso incremental el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.2333 \cdot \left[ (0.504 - 1) + \sqrt{(0.504 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.504}{1232.74 \cdot 0.2333}} \right]$$

$$= 1.47 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del carril compartido del acceso Oeste será de:

$$R = R_u + R_i = 10.17 + 1.47 = 11.64 \text{ segundos/vehículo}$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando presenta un Nivel de Servicio B.

Tabla 58. Resumen resultados. Acceso Oeste. Intersección n°2

RESUMEN ACCESO OESTE	
Retraso (s /veh)	11,64
Ratio Vol - Cap	0,504
Nivel de servicio	NS B

### Estudio del acceso Norte. Carril Cascales

Finalmente estudiaremos el acceso Norte de la intersección, un carril que se caracteriza por dar paso a los movimientos de giro a derecha y a izquierda, en el caso de giro a izquierda el movimiento es protegido, mientras que el giro a derecha es permitido, ya que se encuentra el paso de peatones en su camino, pero como en el tiempo de estudio no se registró ninguna peatón, para su análisis tomaremos este movimiento como protegido, lo que lo convierte en un caso singular cuyo procedimiento de cálculo para el flujo ajustado de saturación se encuentra en el capítulo 31 del HCM.



Ilustración 43. Intersección nº2. Acceso Norte. Fuente: Elaboración propia

En este caso especial, la ecuación utilizada para calcular el flujo ajustado de saturación será la siguiente:

$$s_{lr} = \frac{s_{th}}{1 + P_L \cdot (E_{L,m} - 1) + P_R \cdot (E_{R,m} - 1)}$$

Como en los anteriores casos comenzamos calculando el flujo base de saturación y los factores correctores.

El flujo base de saturación es el mismo que en los anteriores accesos de la intersección.

$$s_0 = 1900 \frac{veh}{h \cdot carril}$$

Al igual que el factor de ajuste por ancho de carril  $f_w = 1$ .

Como no se registró ningún vehículo pesado en este acceso el factor de ajuste por vehículos pesados es  $f_{HV} = 1$ .

La inclinación de la rasante es nula, por lo tanto.

$$f_g = 1 - \frac{P_g}{200} = 1 - \frac{0}{200} = 1$$

Sabiendo que no hay plazas de aparcamiento en la zona de influencia de la intersección.

$$f_p = 1$$

Por otro lado, como no hay ninguna parada de autobús en la zona de influencia de la intersección el factor de corrección debido a las paradas de los vehículos de transporte urbano será unitario.  $f_{bb} = 1$ .

El factor de ajuste por tipo de área y el de ajuste por uso de carril siguen siendo los mismos,  $f_a = 0.9$  y  $f_{LU} = 1$ .

Una vez tenemos los factores de corrección comenzamos a calcular el flujo de saturación de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} s_{th} &= s_0 \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} = 1900 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.9 \cdot 1 = \\ &= 1710 \frac{veh}{h \cdot carril} \end{aligned}$$

Continuamos calculando los factores del divisor de la fórmula utilizada para obtener el flujo ajustado de saturación.

$$E_{L,m} = (E_L - 1) \cdot P_{lc} + 1$$

Donde:

$$P_{lc} = 1 - \left( \left[ 2 \cdot \frac{v_{app}}{s_{lc}} \right] - 1 \right)^2 \geq 0$$

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores:

$$P_{lc} = 1 - \left( \left[ 2 \cdot \frac{8}{972.973} \right] - 1 \right)^2 = 0.0326 \geq 0 \rightarrow ok$$

$$E_{L,m} = \left( \frac{2}{2} - 1 \right) \cdot 0.0326 + 1 = 1$$

Como la proporción de vehículos que giran a la derecha ( $P_R$ ) es 0 durante el periodo de tiempo de estudio, podemos sustituir directamente en la ecuación del cálculo del flujo ajustado de saturación.

$$\begin{aligned} s_{tr} &= \frac{s_{th}}{1 + P_L \cdot (E_{L,m} - 1) + P_R \cdot (E_{R,m} - 1)} = \frac{1710}{1 + 1 \cdot (1 - 1) + 0 \cdot (E_{R,m} - 1)} = \\ &= 1710 \text{ veh/hora} \end{aligned}$$

Conocido el valor del flujo ajustado de saturación podemos calcular la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde. Para ello será necesario definir previamente el

tipo de llegada del grupo de carriles y conocer la duración de la fase verde y del ciclo completo de señalización.

Así pues, en este caso, podemos considerar que la llegada será de tipo 1, ya que más del 80 % del volumen de tráfico llega al comienzo de la fase roja, teniendo una señalización desfavorable en la dirección de estudio y buena progresión en la otra dirección.

Por tanto, sabiendo que la duración de la fase verde para este semáforo es de 20 segundos y que el ciclo dura 140 segundos, el valor de la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde será el siguiente:

$$P = R_p \cdot \frac{g}{C} = 0.33 \cdot \frac{20}{140} = 0.047$$

→ El 4.7 % de los vehículos llegan durante la fase verde

Tras haber obtenido los datos anteriores, podemos pasar al cálculo de los retrasos, por lo que comenzaremos calculado la capacidad del carril, como se hizo en los accesos anteriores.

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 1710 \cdot \frac{20}{140} = 244.28 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{2 \cdot \frac{60}{14}}{244.28} = 0.035$$

### Retraso uniforme

Los datos necesarios para la construcción de los polígonos de acumulación de colas son los mostrados en las tablas 59 y 60.

Tabla 59. Datos sobre la señalización. Acceso Norte

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	20
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	117
Duración del ciclo	140

Tabla 60. Datos sobre demanda. Acceso Norte

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	2
Vehículos por ciclo	0,33
Media de vehículos en cola por ciclo	0,16
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	0,48

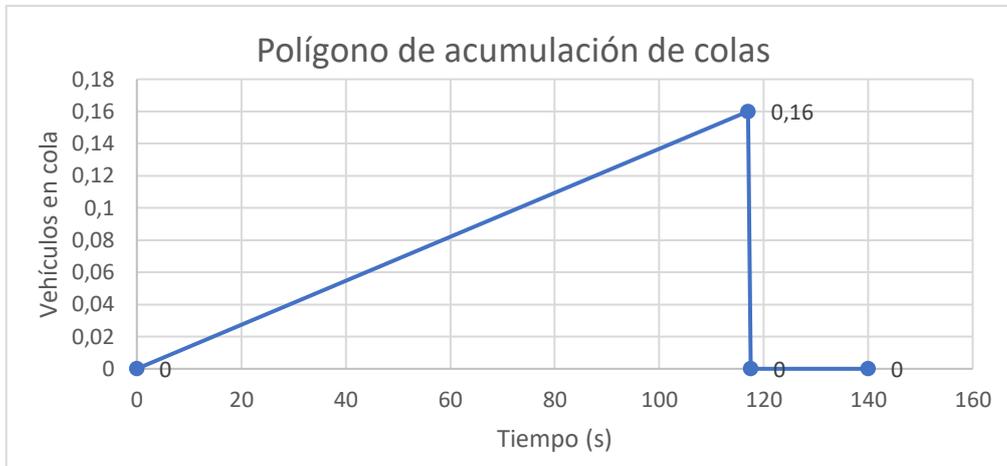


Ilustración 44. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº2. Acceso Norte. Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(117 + 0,48) \cdot 0,16}{2} = 9,39 \text{ segundos}$$

$$\text{Retraso uniforme} = \frac{9,39}{0,33} = 28,48 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso incremental

Por otro lado, debemos calcular el valor del retraso incremental, el cual se obtendrá mediante la aplicación directa de una ecuación en la cual se han de emplear los siguientes valores:

Tabla 61. Datos para retraso incremental. Intersección nº2. Acceso Norte

Duración del periodo de análisis (T)	0,2333 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,035
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	244,28 veh/h

Siendo el valor del retraso incremental el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.2333 \cdot \left[ (0.035 - 1) + \sqrt{(0.035 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.035}{244.28 \cdot 0.2333}} \right]$$

$$= 0.27 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del acceso Norte será de:

$$R = R_u + R_i = 28.48 + 0.27 = 28.75 \text{ segundos/vehículo}$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando presenta un Nivel de Servicio C.

Tabla 62. Resumen resultados. Acceso Norte. Intersección nº2

RESUMEN ACCESO NORTE	
Retraso (s /veh)	28,75
Ratio Vol - Cap	0,035
Nivel de servicio	NS C

### Estudio conjunto de la intersección nº2.

Para concluir con el análisis de la segunda intersección, se puede realizar un estudio conjunto de todos los accesos de la misma. El HCM propone 3 tipos de procedimientos o hipótesis como pudimos ver en la anterior intersección.

**Procedimiento 1:** Se fija el peor nivel de servicio de todos los carriles observados individualmente. De este modo, el resultado sería que la intersección estaría actuando bajo un NS C, ya que en uno de sus accesos presenta un carril con este nivel de servicio con un retraso equivalente de 28.75 segundos por vehículo, concretamente en el acceso Norte.

**Procedimiento 2:** Se realiza una media aritmética de los retrasos de todos los grupos de carriles estudiados, el valor obtenido para la intersección globalmente sería el siguiente.

*Tabla 63. Retraso medio. Intersección n°2*

Retraso del Acceso Norte - Grupo 1 - Carril compartido	28,75	seg/veh
Retraso del Acceso Este - Grupo 1 - Carril compartido	1,26	seg/veh
Retraso del Acceso Este - Grupo 2 - Carril exclusivo	0,84	seg/veh
Retraso del Acceso Oeste - Grupo 1 - Carril exclusivo	11,64	seg/veh
Retraso medio	<b>10,62</b>	<b>seg/veh</b>
<b>Nivel de servicio de la intersección</b>	<b>NS B</b>	

**Procedimiento 3:** Este procedimiento se corresponde con el modo recomendado por el HCM, el cual consiste en calcular el nivel de servicio de la intersección mediante la realización de una media del retraso producido en cada uno de los grupos de carriles, ponderada por el volumen de usuarios de dicho carril. De este modo, el nivel de servicio global de la intersección sería el siguiente.

*Tabla 64. Retraso ponderado. Intersección n°2*

	Retraso (seg/veh)	Volumen (veh)
Retraso del Acceso Norte - Grupo 1 - Carril compartido	28,75	2
Retraso del Acceso Este - Grupo 1 - Carril compartido	1,26	34
Retraso del Acceso Este - Grupo 2 - Carril exclusivo	0,84	78
Retraso del Acceso Oeste - Grupo 1 - Carril exclusivo	11,64	145
Retraso ponderado	<b>7,16</b>	
<b>Nivel de servicio de la intersección</b>	<b>NS A</b>	

## **Conclusiones sobre la intersección n°2**

Tras haber estudiado la intersección n°2 se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- La intersección en sí no tiene un gran retraso por vehículo, como se ha podido ver en la tabla 65 tiene un retraso ponderado de 7.16 segundos, lo que demuestra que la intersección tiene un nivel de servicio A, que es muy bueno, pero éste no ha sido el motivo de la elección de esta intersección, ya que el verdadero motivo de su elección es que se había comprobado que en el acceso Norte la afluencia de vehículos era muy escasa, como se ha podido comprobar al registrar sólo 2 vehículos en 14 minutos, lo que provoca que el semáforo corte el flujo de vehículos en la otra corriente, una gran avenida por la que discurren una elevada densidad de vehículos, es decir, si ciclo tras ciclo en el cual no acuden vehículos

por el carril Cascales el semáforo se encontrara en fase verde para los vehículos que acceden a la intersección por la avenida ciudad de Almería, el retraso por vehículo podría disminuirse e incluso acercarse a ser un retraso por vehículo nulo.

- El tiempo de la fase verde del acceso Norte no se corresponde con la afluencia de vehículos a la intersección, ya que tiene una duración de 20 segundos, y teniendo en cuenta el poco tráfico que accede por este carril, podría ajustarse mejor, ya que es una intersección con tiempos fijos, reduciéndose al mínimo para así reducir los retrasos a los vehículos que circulan por la avenida ciudad de Almería.

### **4.3. INTERSECCIÓN N°3. C/ TORRE DE ROMO CON C/ MOZART Y C/ ALAMEDA DE LOS CAPUCHINOS**

#### **4.3.1. Introducción**

La tercera y última intersección que se pretende analizar en este TFM es la formada por las calles Torre de Romo, Mozart y Alameda de los Capuchinos, ubicada en el "Barrio del Carmen" de la ciudad de Murcia. Tiene la peculiaridad de que está formada por 4 ramas y sólo se puede acceder desde 3 de ellas, ya que la calle Alameda de los Capuchinos es de sentido único y saliente de la intersección.



*Imagen 8. Vista aérea intersección n°3. Fuente: Google Earth*

Debido a la orientación de la intersección que se puede ver en la imagen 8, se han designado las ramas de la siguiente manera:

- La calle Mozart será el acceso Noreste.
- La calle Torre de Romo al tener 2 ramas dentro de la intersección, se designará como los accesos Sureste y Noroeste.
- Mientras que la calle Alameda de los capuchinos no tendrá ningún acceso a la intersección.

Esta intersección tiene la particularidad como se ha mencionado antes de que está formada por 4 ramas en x, pero a la que se puede acceder solamente por 3 de ellas, tiene 2 carriles exclusivos para el giro creados unos metros antes de la intersección y una distribución de fases muy variada teniendo varios movimientos afectados por el tráfico de peatones, que es elevado debido a la ubicación céntrica de la intersección.

Conocidos los motivos de la elección de esta intersección, se procede a exponer las particularidades de cada uno de los accesos como se realizó en las intersecciones anteriores.

- Desde el acceso Noreste (Calle Mozart) discurren 3 carriles, el carril derecho en el sentido de circulación del tráfico es un carril compartido que permite el movimiento de paso y el giro a derecha permitido, ya que también está en fase verde para realizar el movimiento de paso de los peatones en la calle Torre de Romo, el central permite el movimiento de paso y el giro a izquierda permitido por la misma razón que el carril derecho, y por último el carril de la izquierda en el sentido del tráfico, que es un carril exclusivo para el giro a izquierda permitido, que nace a unos 15 metros antes de la línea de detención de la intersección.
- En el acceso Noroeste (calle Torre de Romo) hay solamente un carril compartido, que permite realizar los movimientos de paso y giro a derecha de forma permitida, ya que al mismo instante están cruzando los peatones la calle Alameda de los Capuchinos. Además, dispone de una zona de aparcamientos en su dorsal derecho.
- Desde el acceso Sureste (calle Torre de Romo) discurren 2 carriles, el de la derecha en sentido de la circulación del tráfico es un carril compartido que permite el movimiento de paso y el giro a derechas permitido, ya que entra en conflicto con los peatones que realizan el movimiento de paso por la calle Mozart, mientras que el carril de la izquierda es un carril exclusivo de giro a izquierda que actúa de forma protegida, hay que decir que este carril nace unos 50 metros antes de llegar a la línea de detención de la intersección y que se ubica una parada de autobús en las inmediaciones de este acceso.

Esta disposición de carriles puede verse más claramente en el croquis de la ilustración 45.

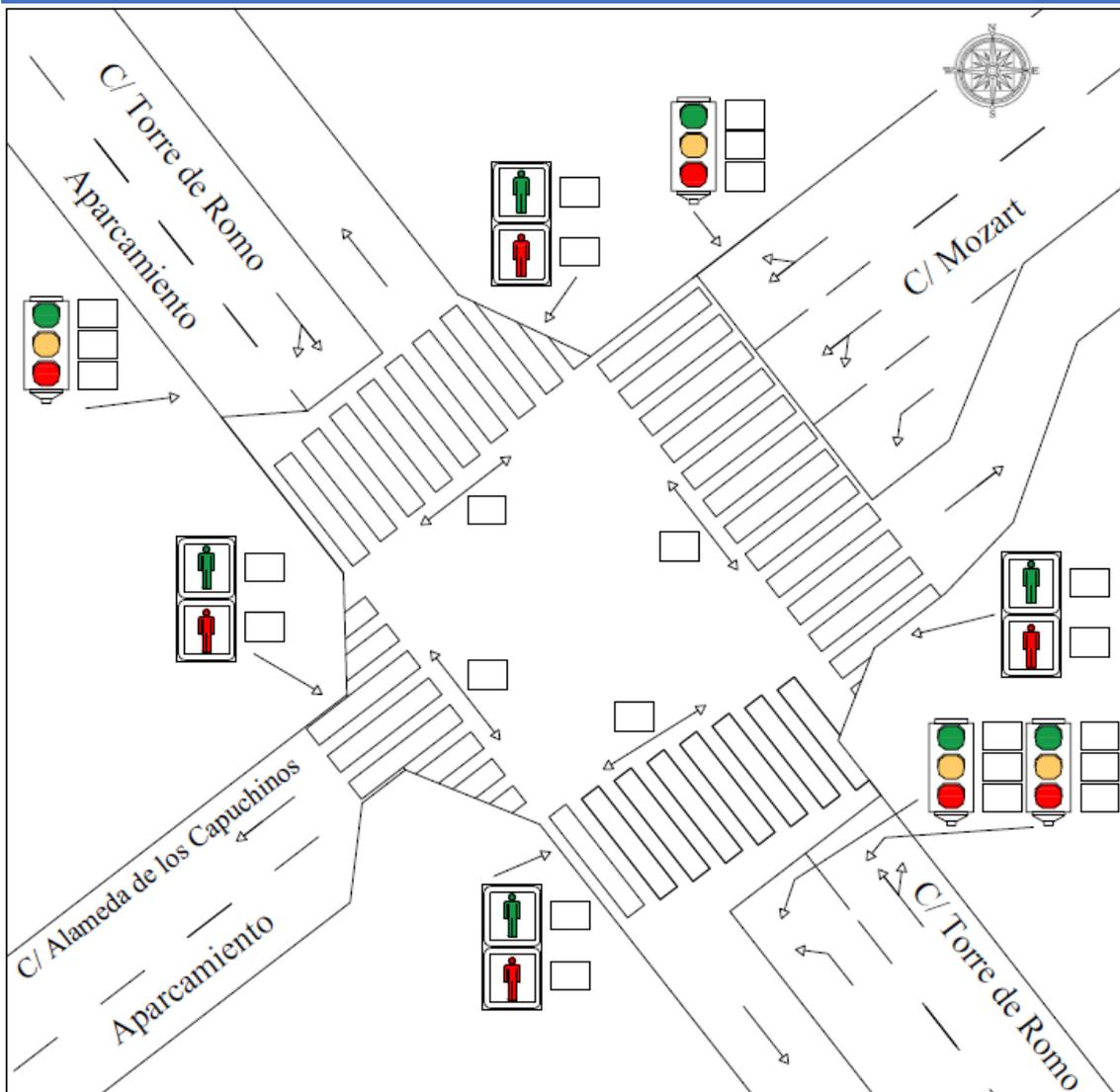


Ilustración 45. Croquis intersección nº3. Fuente: Elaboración propia

### **4.3.2. Herramientas empleadas para el cálculo**

Al igual que en las anteriores intersecciones se han elaborado diversas planillas para facilitar la toma de datos, en este caso se han identificado 3 fases, las cuales han sido aforadas por 2 personas simultáneamente y corresponden con las siguientes.

- Fase 1: Paso de vehículos desde el acceso Noreste y peatones por los pasos de cebra de los accesos Noroeste y Sureste. Los vehículos que hacen el giro a derecha o a izquierda desde la calle Mozart lo realizan en modo permitido ya que el cruce de peatones interfiere en sus maniobras. La duración de esta fase es de 17 segundos en verde, 3 en ámbar y 90 en rojo, siendo la de los pasos de peatones 20 en verde y 90 en rojo.

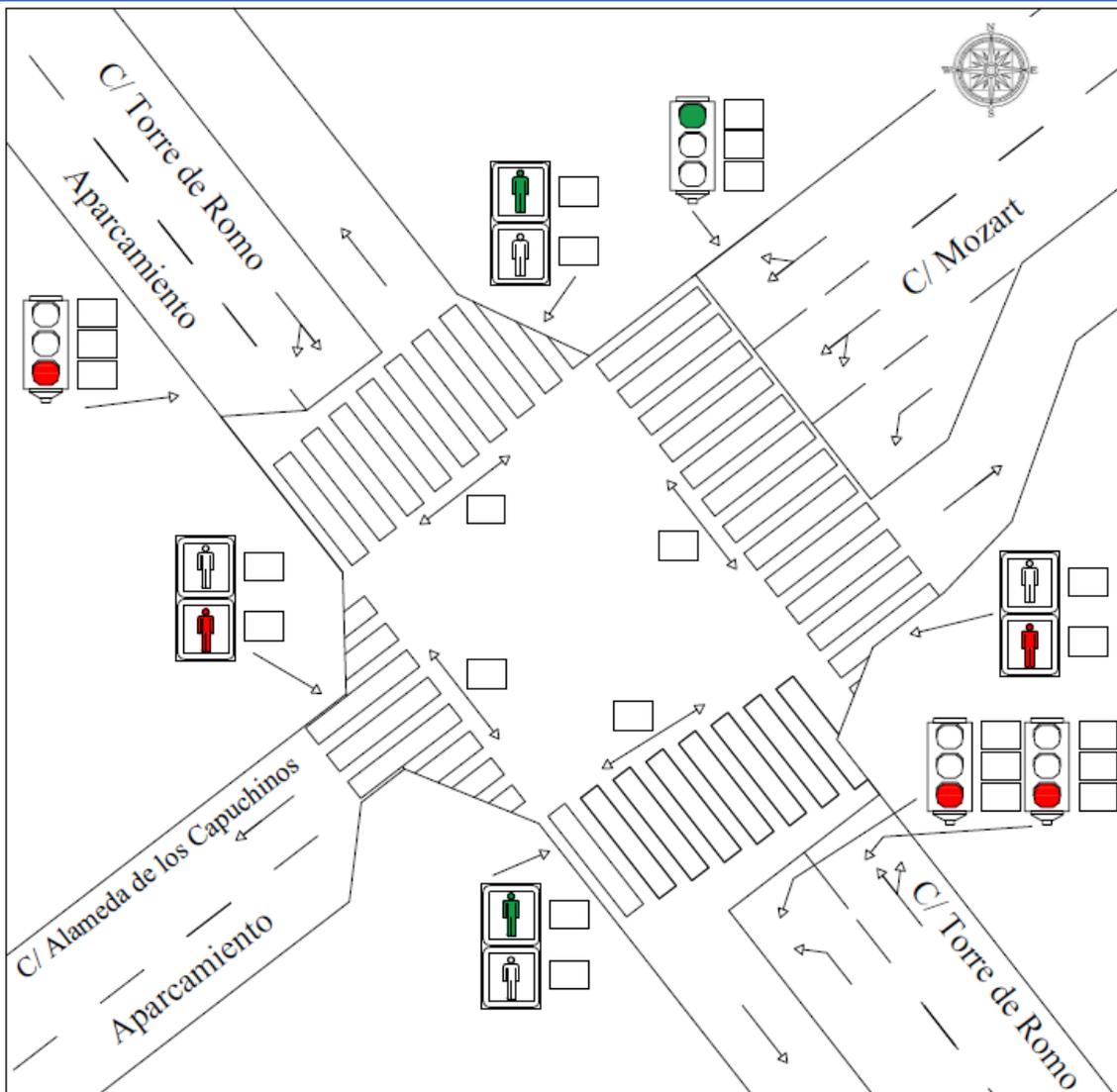


Ilustración 46. Fase 1 de la intersección n°3. Fuente: Elaboración propia

- Fase 2: Paso de vehículos desde los accesos Noroeste y Sureste, es decir desde la calle Torre de Romo, y de peatones por los pasos Suroeste, cruzando la calle Alameda de los Capuchinos, y Noreste, cruzando la calle Mozart. En esta fase el semáforo se encuentra en verde para el acceso Noroeste, que permite el movimiento de paso y el giro a derecha permitido, mientras que en el acceso Sureste, sólo se muestra en verde el semáforo del carril derecho, que permite el movimiento de paso y el giro a derecha permitido, estando el del carril izquierdo exclusivo para el giro a izquierda en rojo. La duración de esta fase es de 43 segundos.

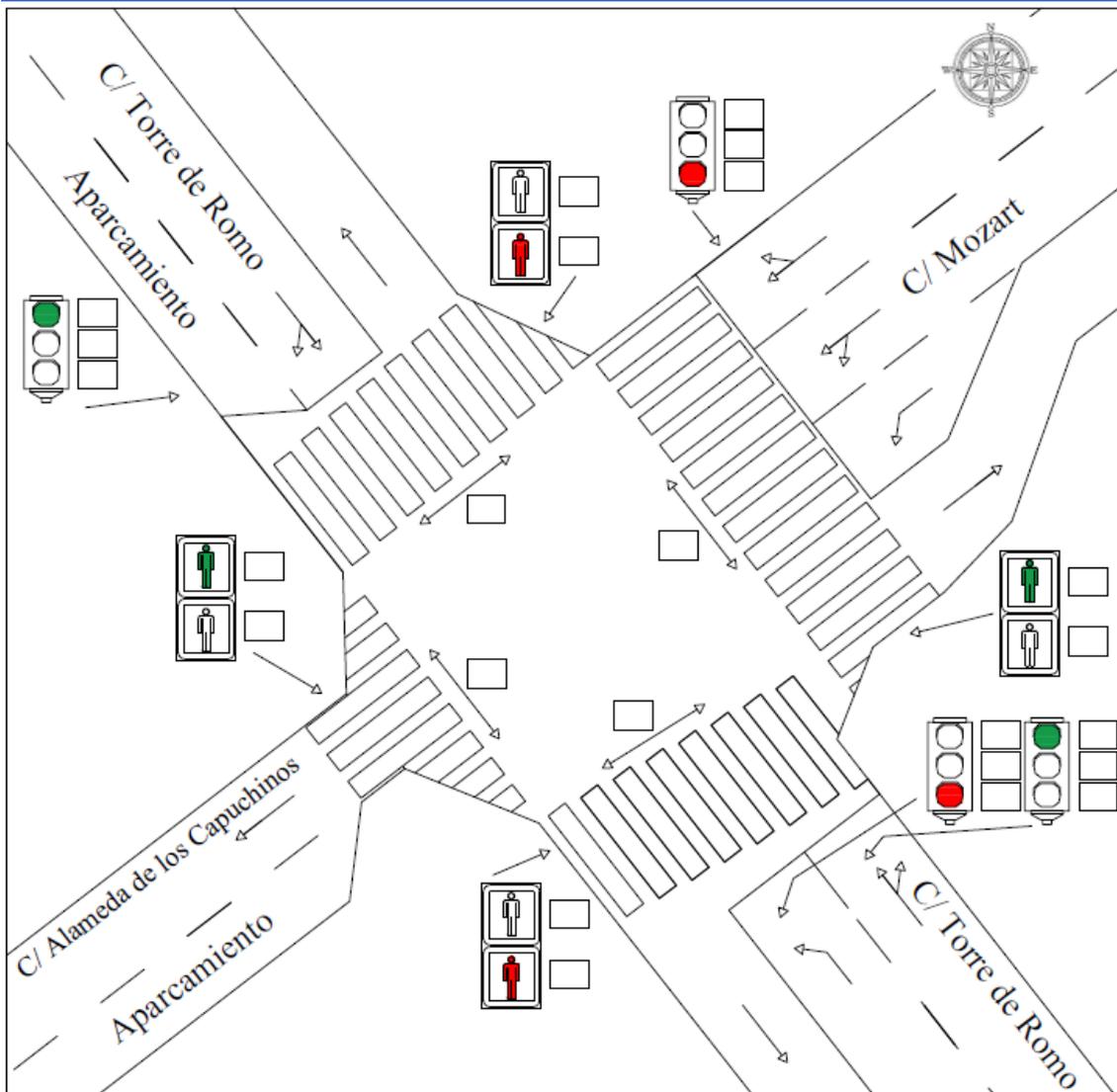


Ilustración 47. Fase 2 de la intersección nº3. Fuente: Elaboración propia

- Fase 3: Paso de vehículos desde el acceso Sureste y de peatones por el acceso Noreste, es decir los que cruzan la calle Mozart. A diferencia de la fase anterior, en ésta los semáforos de los 2 carriles del acceso Sureste se muestran en verde y el del acceso Noroeste cambia a rojo para que los vehículos del carril exclusivo de giro a izquierda puedan hacerlo en modo protegido, y para ello también el semáforo que da paso a los peatones que cruzan la calle Alameda de los Capuchinos también cambia a rojo. La duración de esta fase es de 34 segundos.

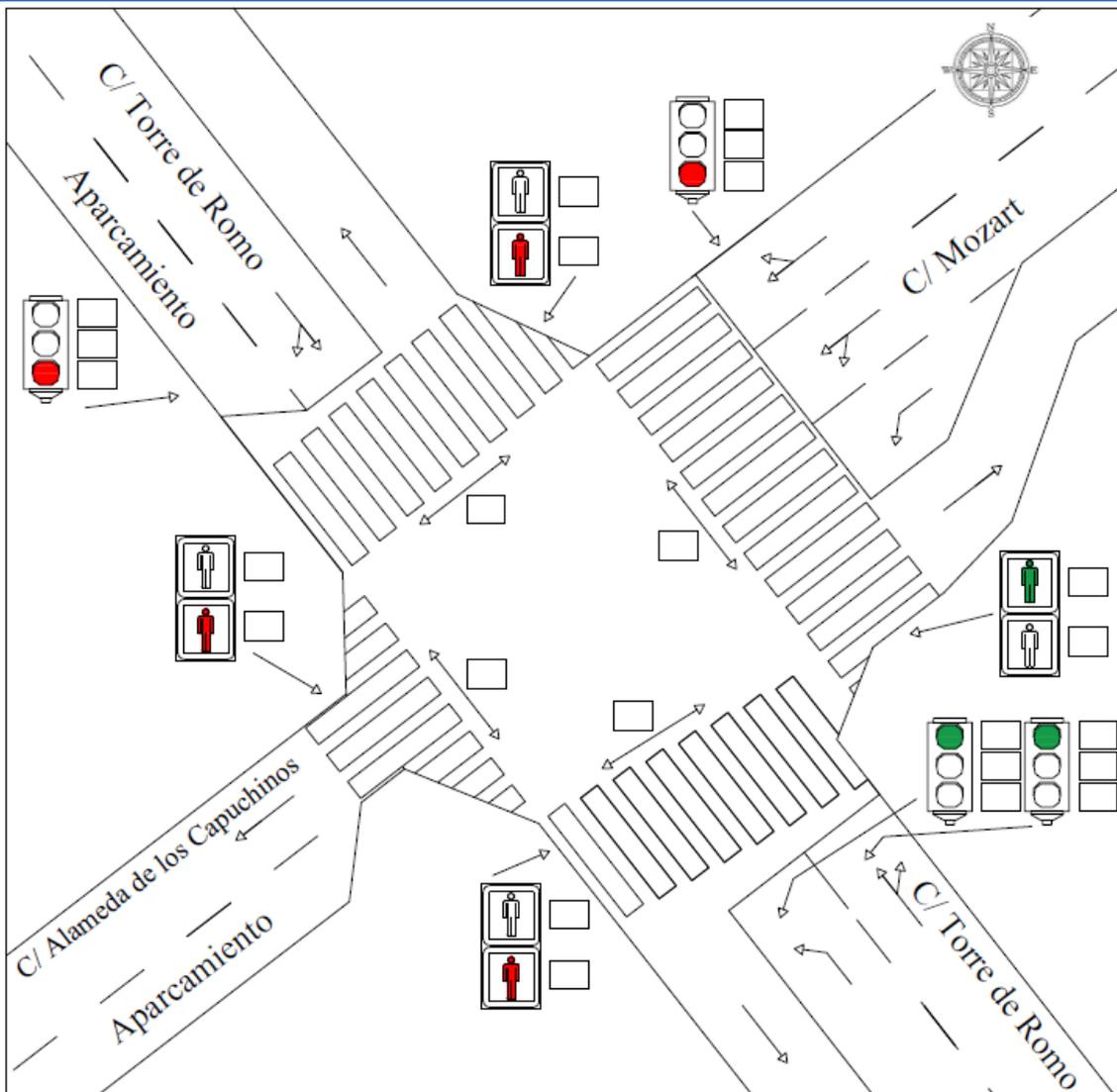


Ilustración 48. Fase 3 de la intersección nº3. Fuente: Elaboración propia

Las planillas empleadas para la toma de datos se presentan a continuación, comenzando por la que se desarrolló para la duración de las fases.

Tabla 65. Planilla para determinación de fases. Fuente: Elaboración propia

	Planilla duración del ciclo (s)			
	Verde peat.	Verde veh.	Ámbar veh.	Rojo
Fase 1				
Fase 2				
Fase 3				

Por otro lado, las planillas empleadas para aforar los vehículos fueron las que se muestran a continuación, teniendo en cuenta que se realizó un análisis aproximado de 15 minutos,

Análisis y mejora de intersecciones semaforizadas en Murcia mediante el control semafórico actuado por vehículos.

debido a que la duración del ciclo completo era de 110 segundos, se realizaron un total de 8 ciclos que tuvieron una duración total de 14 minutos y 40 segundos.

Tabla 66. Planilla de aforo 1. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Noreste - Grupo de carriles 1 (Calle Mozart) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
Total								

Tabla 67. Planilla de aforo 2. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Noreste - Grupo de carriles 2 (Calle Mozart) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
Total								

Tabla 68. Planilla de aforo 3. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Noreste - Grupo de carriles 3 (Calle Mozart) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
Total								

Análisis y mejora de intersecciones semaforizadas en Murcia mediante el control semafórico actuado por vehículos.

Tabla 69. Planilla de aforo 4. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Noroeste - Grupo de carriles 1 (Calle Torre de Romo) fase 2								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
Total								

Tabla 70. Planilla de aforo 5. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Sureste - Grupo de carriles 1 (Calle Torre de Romo) fase 2								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
Total								

Tabla 71. Planilla de aforo 6. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Sureste - Grupo de carriles 2 (Calle Mozart) fase 3								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
Total								

Tabla 72. Planilla de aforo 7. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Sureste - Grupo de carriles 1 (Calle Torre de Romo) fase 3								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
Total								

### 4.3.3. Datos obtenidos durante el aforo

Conocidas las diversas herramientas de trabajo empleadas para el estudio de la intersección nº3 se pueden mostrar los resultados obtenidos para el periodo de estudio escogido, que en este caso corresponde al intervalo entre las 8:45 y las 9:00 del miércoles 8 de junio de 2018.

La elección de esta franja horaria es debido al hecho de que se trata de intersección formada por el cruce de una vía de acceso al centro de la ciudad y una de las arterias principales que comunica el Barrio del Carmen con el Barrio del Infante Don Juan Manuel, se supone que el tráfico es el más elevado ya que es la franja horaria en la cual los trabajadores acuden a sus puestos de trabajo y los padres llevan a sus hijos a los colegios y centros de enseñanza que hay en las cercanías de la intersección.

En cuanto al día de la semana, como en las intersecciones anteriores, se ha escogido un día laborable donde el tráfico rodado es mucho mayor.

Así, los datos obtenidos para la duración de las diferentes fases de las que se componen los ciclos son las siguientes:

*Tabla 73. Fases de señalización de la intersección nº3. Fuente: Elaboración propia*

	Planilla duración del ciclo (s)			
	Verde peat.	Verde veh.	Ámbar veh.	Rojo
Fase 1	20	17	3	90
Fase 2	47	43	3	63
Fase 3	37	34	3	73

Observando la tabla 73 nos damos cuenta de que como ya se dijo al principio de este apartado, la duración total del ciclo es de 110 segundos, registrándose 3 fases en las que se combinan movimientos de vehículos con los de peatones. Entre las distintas fases llama la atención la poca duración de la fase verde para vehículos en la fase 1, que puede ser debido a que al haber 3 carriles la cola de vehículos puede deshacerse más rápidamente, pero aun así puede que tenga el peor nivel de servicio de los accesos a esta intersección, situación que comprobaremos en los análisis posteriores.

Una vez expuestos los datos referentes a la duración de las fases se presentan los obtenidos al llevar a cabo los aforos de tráfico, correspondientes con las siguientes tablas.

Análisis y mejora de intersecciones semaforizadas en Murcia mediante el control semafórico actuado por vehículos.

Tabla 74. Datos planilla de aforo 1. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Noreste - Grupo de carriles 1 (Calle Mozart) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	0	1	2	2	0	3	0,00	0
2	0	1	3	2	0	4	0,00	0
3	0	1	2	2	0	3	0,00	0
4	0	3	3	5	2	6	33,33	0
5	0	2	1	3	0	3	0,00	0
6	0	3	3	1	1	6	16,67	0
7	0	4	2	4	1	6	16,67	0
8	0	2	4	4	0	6	0,00	0
Total	0	17	20	23	4	37	8,33	0

Tabla 75. Datos planilla de aforo 2. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Noreste - Grupo de carriles 2 (Calle Mozart) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	0	2	0	1	0	2	0,00	0
2	1	4	0	4	0	5	0,00	0
3	0	1	0	0	0	1	0,00	0
4	0	6	0	4	1	6	16,67	0
5	2	1	0	3	0	3	0,00	0
6	2	4	0	4	1	6	16,67	0
7	1	3	0	4	0	4	0,00	0
8	3	1	0	3	1	4	25,00	0
Total	9	22	0	23	3	31	7,29	0

Tabla 76. Datos planilla de aforo 3. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Noreste - Grupo de carriles 3 (Calle Mozart) fase 1								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	0	0	0	0	0	0	0,00	0
2	0	0	0	0	0	0	0,00	0
3	1	0	0	0	0	1	0,00	0
4	3	0	0	3	1	3	33,33	0
5	4	0	0	2	0	4	0,00	0
6	2	0	0	2	1	2	50,00	0
7	0	0	0	0	0	0	0,00	0
8	1	0	0	1	0	1	0,00	0
Total	11	0	0	8	2	11	10,42	0

Tabla 77. Datos planilla de aforo 4. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Noroeste - Grupo de carriles 1 (Calle Torre de Romo) fase 2								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	0	3	0	0	0	3	0,00	0
2	0	4	0	0	0	4	0,00	0
3	0	4	0	4	1	4	25,00	0
4	0	6	0	5	0	6	0,00	0
5	0	6	1	3	0	7	0,00	0
6	0	6	2	5	0	8	0,00	0
7	0	2	1	2	0	3	0,00	0
8	0	4	0	3	1	4	25,00	0
Total	0	35	4	22	2	39	6,25	0

Análisis y mejora de intersecciones semaforizadas en Murcia mediante el control semafórico actuado por vehículos.

Tabla 78. Datos planilla de aforo 5. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Sureste - Grupo de carriles 1 (Calle Torre de Romo) fase 2								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	0	6	1	0	1	7	14,29	0
2	0	7	1	0	1	8	12,50	0
3	0	4	0	0	0	4	0,00	0
4	0	3	0	0	1	3	33,33	0
5	0	3	0	0	0	3	0,00	0
6	0	5	1	0	1	6	16,67	0
7	0	5	1	1	2	6	33,33	0
8	0	4	0	0		4	0,00	0
Total	0	37	4	1	6	41	13,76	0

Tabla 79. Datos planilla de aforo 6. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Sureste - Grupo de carriles 2 (Calle Mozart) fase 3								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	0	0	0	0	0	0	0,00	0
2	3	0	0	2	0	3	0,00	0
3	1	0	0	1	0	1	0,00	0
4	0	0	0	0	0	0	0,00	0
5	2	0	0	2	0	2	0,00	0
6	0	0	0	0	0	0	0,00	0
7	2	0	0	1	0	2	0,00	0
8	1	0	0	1	0	1	0,00	0
Total	9	0	0	7	0	9	0,00	0

Tabla 80. Datos planilla de aforo 7. Intersección 3. Fuente: Elaboración propia

Planilla aforo acceso Sureste - Grupo de carriles 1 (Calle Torre de Romo) fase 3								
Ciclo	Giro izquierda	Movimiento de paso	Giro derecha	Almacenamiento de vehículos en cola	Vehículos pesados	Vehículos totales	% Vehículos pesados	Veh. En cola al final del ciclo
1	0	2	1	0	0	3	0,00	0
2	0	3	0	0	0	3	0,00	0
3	0	4	0	0	0	4	0,00	0
4	0	4	1	0	0	5	0,00	0
5	0	1	0	0	0	1	0,00	0
6	0	1	0	0	0	1	0,00	0
7	0	2	0	0	0	2	0,00	0
8	0	2	1	0	0	3	0,00	0
Total	0	19	3	0	0	22	0,00	0

Como en las anteriores intersecciones se ha elaborado un croquis simplificado que resume los datos que se muestran desde la tabla 74 a la 80.

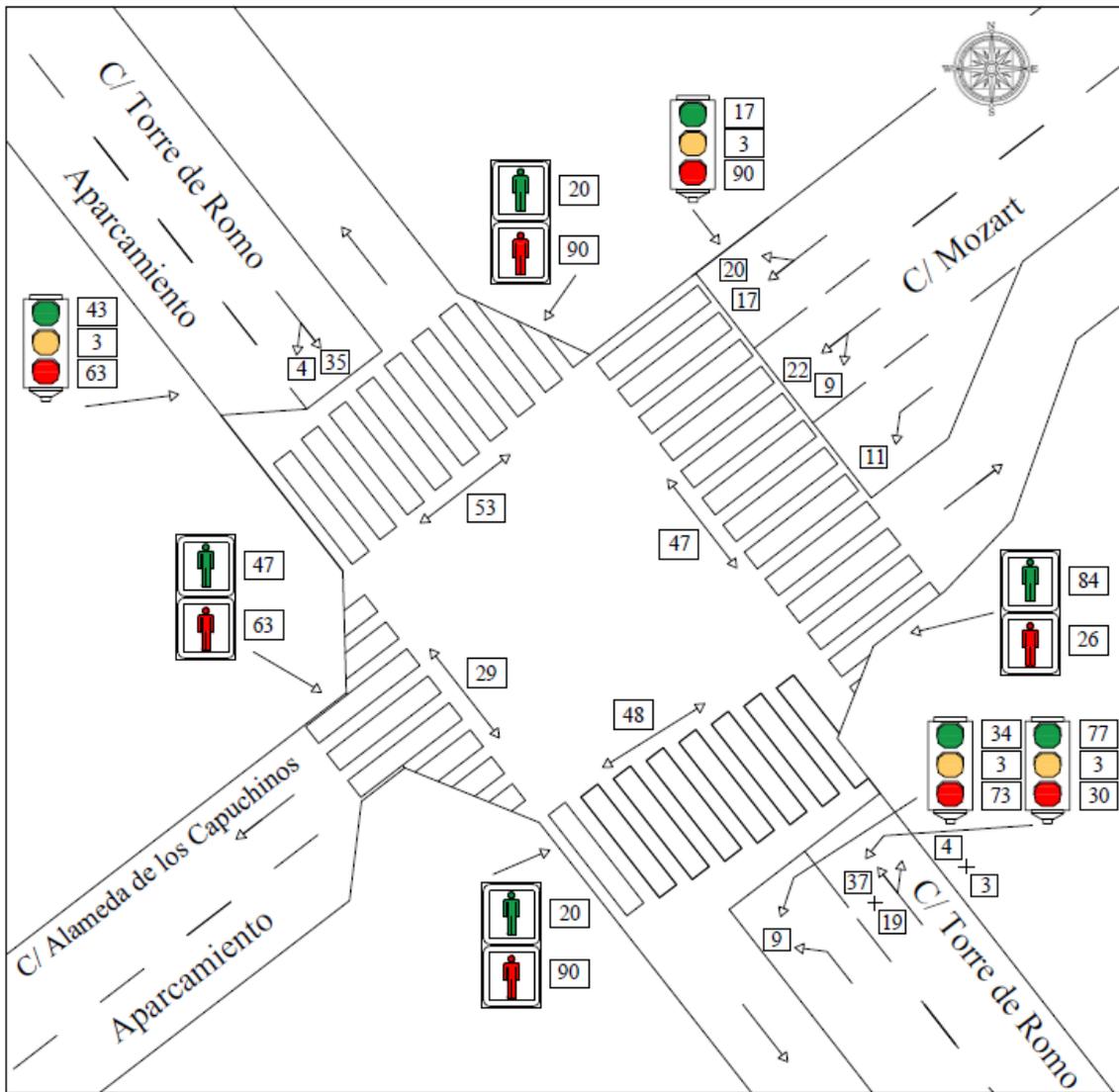


Ilustración 49. Croquis completo intersección nº3. Fuente: Elaboración propia

Los datos mostrados en el croquis de la ilustración 49 son los siguientes:

- Junto a cada una de las flechas que representan los movimientos permitidos, el volumen de vehículos registrados para dicho movimiento. Es importante tener en cuenta que en los carriles compartidos se muestran los valores de ambos movimientos, como por ejemplo, en el carril compartido del acceso Sureste, el valor de 4 corresponde con los vehículos que realizan el giro a derecha y 37 el que realizan el movimiento de paso en la fase 2, mientras que 3 y 19 pertenecen a los movimientos de giro a derecha y paso respectivamente de la fase 3.

- Junto a cada semáforo se muestran los valores de la duración de cada una de las fases, es decir, la verde, ámbar y roja, tanto para los de los vehículos como los de peatones que se encuentran referenciados mediante una flecha.
- Por último, junto a cada uno de los pasos de peatones se muestra el dato registrado referente al volumen de peatones que cruzaron en el periodo de estudio en ambas direcciones.

#### **4.3.4. Aplicación del método del HCM a la intersección n°3.**

Al igual que en las intersecciones anteriores, el primer paso a realizar para llevar a cabo la aplicación del método propuesto por el HCM es la determinación de los diversos grupos de carriles y de movimientos que podemos observar en la intersección. Por ello, es importante recordar los criterios que se emplean para determinar dichos conceptos.

Determinaremos como grupo de movimiento los siguientes casos:

- Un movimiento de giro que sea servido por uno o más carriles exclusivos debe ser designado como un grupo de movimiento.
- Los carriles no asignados a un grupo por la regla anterior han de combinarse en un grupo de movimiento.

Por último, para diferenciar los grupos de carriles emplearemos los siguientes criterios:

- Uno o más carriles exclusivos de giro a la izquierda o de giro a la derecha deben designarse como un grupo de carriles.
- Los carriles compartidos deben designarse como un grupo.
- Los carriles que no sean compartidos o exclusivos de giro han de combinarse en un único grupo.

Así, conocido lo anterior, se procede a estudiar la intersección por accesos.

#### **Estudio del Acceso Noreste. Calle Mozart**

Se analizará en primer lugar el acceso Noreste de la intersección, cuya visión a pie de asfalto es el de la ilustración 50.



*Ilustración 50. Intersección n°3. Acceso Noreste. Fuente: Elaboración propia*

Como puede observarse, en este acceso hay 3 grupos de carriles, que empezando de derecha a izquierda son: un carril compartido de giro a derecha y paso, un carril que permite el movimiento de paso y giro a izquierda y un carril exclusivo de giro a izquierda.

### **Grupo de carriles 1. Carril compartido de paso y giro a derecha permitido.**

Comenzaremos calculando como en los anteriores casos el flujo de saturación y los factores correctores.

El flujo base de saturación tomado es el mismo que el de la intersección n°2 al tener una población mayor de 250.000 habitantes en la zona de influencia de la intersección.

$$s_0 = 1900 \frac{veh}{h \cdot carril}$$

El ancho de carril sigue estando entre los 3 y 3.92 metros por los que el factor de ajuste por ancho de carril será  $f_w = 1$ .

Sabiendo que el porcentaje de vehículos pesados que acceden por este carril es el 8.33 %, el factor de ajuste por vehículos pesados será.

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_{HV}(E_T - 1)} = \frac{100}{100 + 8.33 \cdot (2 - 1)} = 0.9231$$

La inclinación de la rasante es nula, por lo tanto.

$$f_g = 1 - \frac{P_g}{200} = 1 - \frac{0}{200} = 1$$

Sabiendo que no hay plazas de aparcamiento en la zona de influencia de la intersección.

$$f_p = 1$$

Por otro lado, como no hay ninguna parada de autobús en la zona de influencia de la intersección el factor de corrección debido a las paradas de los vehículos de transporte urbano será unitario.  $f_{bb} = 1$ .

El factor de ajuste por tipo de área y el de ajuste por uso de carril siguen siendo los mismos,  $f_a = 0.9$  y  $f_{LU} = 1$ .

Una vez tenemos los factores de corrección comenzamos a calcular el flujo de saturación de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} s_{th} &= s_0 \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} = 1900 \cdot 1 \cdot 0.9231 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.9 \cdot 1 = \\ &= 1578.51 \frac{veh}{h \cdot carril} \end{aligned}$$

En este caso en el que tenemos un carril compartido que permite el movimiento de paso y el giro a derecha permitido, el HCM nos propone la siguiente ecuación, que ya hemos visto en parte en la intersección nº1 por lo que se omiten los significados de los términos.

$$s_{sr} = \frac{s_{th}}{1 + P_R \cdot (E_{R,m} - 1)}$$

Para la aplicación de la ecuación anterior es necesario calcular el valor de  $E_{R,m}$ , mediante la siguiente expresión.

$$E_{R,m} = \left( \frac{E_R}{f_{Rpb}} - 1 \right) \cdot P_{lc} + 1$$

El valor de  $P_{lc}$  se obtiene aplicando la siguiente ecuación.

$$P_{lc} = 1 - \left( \left[ 2 \cdot \frac{v_{app}}{s_{lc}} \right] - 1 \right)^2 \geq 0$$

Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$P_{lc} = 1 - \left( \left[ 2 \cdot \frac{148}{972.973} \right] - 1 \right)^2 = 0.5159 \geq 0 \rightarrow ok$$

Para calcular  $E_{R,m}$  necesitamos conocer  $f_{Rpb}$ .

Así, con carácter previo a la exposición del método se deben presentar las observaciones referidas en el apartado “3.2.2.1. Paso 4” del presente TFM para la interferencia de los movimientos de vehículos, peatones y bicicletas en los giros a la derecha.

- Si no existen peatones o bicicletas en conflicto con el movimiento de giro a la derecha, el valor de  $f_{Rpb}$  será igual a 1.
- Si se realiza el giro como una operación protegida, el valor de  $f_{Rpb}$  será igual a 1.
- Si se realiza el giro bajo una operación protegida-permitida, el procedimiento a emplear para el cálculo del valor de  $f_{Rpb}$  será el primero de los dos descritos en el capítulo 31 de la instrucción americana.

Por tanto, utilizaremos el primer método descrito en dicho apartado presentando solamente los resultados.

i. Determinación del flujo de peatones durante su fase verde.

$$v_{pedg} = v_{ped} \cdot \frac{C}{g_{ped}} = 212 \cdot \frac{110}{20} = 1166 \frac{\text{peatones}}{h} \leq 5000 \rightarrow ok$$

ii. Determinación de la ocupación media de los peatones.

Como el flujo horario de peatones durante la fase verde es mayor que 1000, la ocupación media de estos se calcula mediante la siguiente expresión.

$$OCC_{pedg} = 0.4 + \frac{v_{pedg}}{10000} = 0.4 + \frac{1166}{10000} = 0.5166 \leq 0.9 \rightarrow ok$$

iii. Determinación del flujo de bicicletas durante su indicación verde.

En el caso de la intersección que se está estudiando, el flujo de bicicletas es despreciable.

iv. Determinación de la ocupación media de las bicicletas

En el caso de la intersección que se está estudiando, el flujo de bicicletas es despreciable.

v. Determinación de la ocupación relevante de la zona de conflicto.

Para giros a la derecha sin interferencia de bicicletas, como es el caso se utiliza la siguiente ecuación:

$$OCC_r = \frac{g_{ped}}{g} \cdot OCC_{pedg} = \frac{20}{20} \cdot 0.5166 = 0.5166$$

Como se puede observar, debido a que la duración de la fase verde para los peatones coincide en esta intersección con la duración del verde efectivo de los vehículos (verde + ámbar), la ocupación relevante será equivalente a la ocupación anterior.

vi. Determinación del tiempo desocupado de la zona de conflicto.

Teniendo en cuenta que el número de carriles emisores de vehículos que realizan el giro es igual al de carriles receptores, el valor vendrá dado por la siguiente ecuación.

$$A_{pbT} = 1 - OCC_r = 1 - 0.5166 = 0.4834$$

vii. Determinación del factor de ajuste para el flujo de saturación.

Para determinar el valor definitivo del factor corrector para el flujo base de saturación se tendrá en cuenta que se trata de un giro a la derecha realizado como operación permitida.

Por lo que el valor de  $f_{Rpb}$  será igual al de  $A_{pbT}$

$$f_{Rpb} = A_{pbT} = 0.4834$$

Una vez tenemos este dato podemos sustituir en la ecuación de  $E_{R,m}$ .

$$E_{R,m} = \left( \frac{E_R}{f_{Rpb}} - 1 \right) \cdot P_{lc} + 1 = \left( \frac{1.18}{0.4834} - 1 \right) \cdot 0.5159 + 1 = 1.7434$$

Una vez tenemos todo podemos sustituir en la ecuación para el cálculo del flujo ajustado de saturación.

$$s_{sr} = \frac{s_{th}}{1 + P_R \cdot (E_{R,m} - 1)} = \frac{1578.51}{1 + \frac{20}{37} \cdot (1.7434 - 1)} = 1126.03 \text{ veh/hora}$$

Conocido el valor del flujo ajustado de saturación se puede pasar a calcular la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde, debiendo definirse previamente al igual que en los casos anteriores el tipo de llegada.

Así pues, en el caso que estamos estudiando, podemos considerar que la llegada será tipo 2, pues entre el 40 y el 80 % de los vehículos llegan durante la fase roja a la intersección en grupos moderadamente densos. Esto supone que el valor del coeficiente de grupo sea

de 0.67 de acuerdo al criterio del HCM, como se puede ver en la tabla 5 del presente TFM.

Por tanto, sabiendo que la duración de la fase verde para este semáforo es de 17 segundos y que el ciclo dura 110 segundos, el valor de la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde será el siguiente:

$$P = R_p \cdot \frac{g}{C} = 0.67 \cdot \frac{17}{110} = 0.1035$$

→ El 10.35 % de los vehículos llega durante la fase verde

Por último, antes de pasar al cálculo de los retrasos producidos en el grupo de carriles, debemos obtener el valor del ratio volumen capacidad de dicho grupo. Para ello será necesario calcular en primer lugar la capacidad de la intersección, empleando los valores del número de carriles que hay en el grupo (N), el flujo ajustado de saturación (s) y la duración de la fase verde (g) y del ciclo completo (C). Así, la capacidad en el grupo de carriles que estamos estudiando será:

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 1126.03 \cdot \frac{17}{110} = 174 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{37 \cdot \frac{60}{14.66}}{174} = 0.87$$

Conocido el ratio volumen-capacidad podemos pasar a calcular los retrasos, a través de los cuales estaremos en disposición de clasificar la intersección en un determinado nivel de servicio. Dicho cálculo estará dividido en dos partes. Así, comenzaremos calculando el retraso uniforme y posteriormente le añadiremos el valor del retraso incremental, obteniendo de este modo el valor total de los retrasos generados para los usuarios de este grupo de carriles.

### **Retraso uniforme**

Para el cálculo del retraso uniforme es necesaria la construcción de los polígonos de acumulación de colas, para lo que debemos emplear los siguientes datos:

Tabla 81. Datos sobre la señalización. Acceso Noreste. Grupo de carriles 1.

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	17
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	90
Duración del ciclo	110

Tabla 82. Datos sobre la demanda. Acceso Noreste. Grupo de carriles 1.

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	37
Vehículos por ciclo	4,63
Media de vehículos en cola por ciclo	2,88
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	8,63

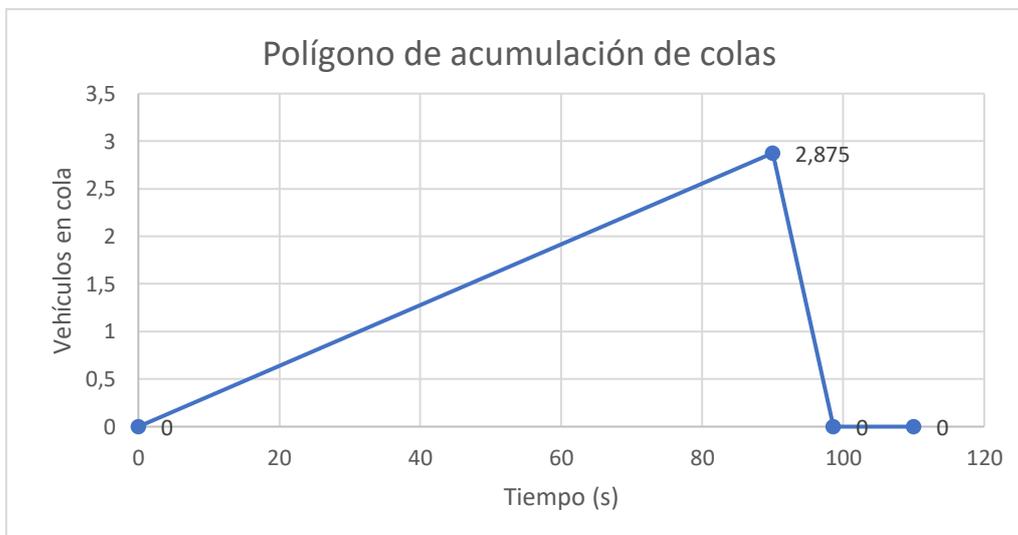


Ilustración 51. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº3. Acceso Noreste. Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo como en los anteriores grupos de carriles.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(90 + 8.63) \cdot 2.875}{2} = 141.78 \text{ segundos}$$

$$\text{Retraso uniforme} = \frac{141.78}{4.63} = 30.62 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso incremental

Por otro lado, debemos calcular el valor del retraso incremental, el cual se obtendrá mediante la aplicación directa de una ecuación en la cual se han de emplear los siguientes valores:

Tabla 83. Datos para retraso incremental. Intersección n°3. Acceso Noreste. Grupo de carriles 1

Duración del periodo de análisis (T)	0,2443 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,87
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	174 veh/h

Entre ellos podemos encontrar el valor de la duración del periodo de análisis, que en este caso será de 0.2443 correspondiéndose con los 14 minutos y 40 segundos estudiados.

Así, el valor del retraso incremental será el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.2443 \cdot \left[ (0.87 - 1) + \sqrt{(0.87 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.87}{174 \cdot 0.2443}} \right]$$

$$= 40.51 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del grupo de carriles 1 será de:

$$R = R_u + R_i = 30.62 + 40.51 = 71.13 \text{ segundos/vehículo}$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando tiene un Nivel de Servicio E.

Tabla 84. Resumen resultados. Acceso Noreste. Grupo de carriles 1. Intersección n°3

RESUMEN ACCESO NORESTE - GRUPO DE CARRILES 1	
Retraso (s /veh)	71,13
Ratio Vol - Cap	0,87
Nivel de servicio	NS E

### Grupo de carriles 2. Carril compartido de paso y giro a izquierda permitido.

Este grupo de carriles tiene la peculiaridad de que permite el movimiento de paso y el giro a izquierda de modo permitido, ya que tiene que cruzar un flujo de peatones que tiene preferencia y otra característica a destacar es que no posee ninguna corriente opuesta que le dificulte el giro a izquierda, lo que le permitirá un mejor nivel de servicio, el cálculo del flujo ajustado de saturación se contempla en el capítulo 31 del HCM y su desarrollo es el siguiente.

$$s_{sl3} = \frac{s_{th}}{1 + P_L \cdot \left( \frac{E_{L1}}{f_{Lpb}} - 1 \right)}$$

Comenzamos obteniendo el flujo base de saturación, que será el mismo que el del carril contiguo.

$$s_0 = 1900 \frac{veh}{h \cdot carril}$$

Los demás factores tienen el mismo valor que el grupo de carriles anterior a excepción del factor corrector por vehículos pesados, que sabiendo que el 7.29 % de los vehículos registrados son pesados el factor será:

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_{HV}(E_T - 1)} = \frac{100}{100 + 7.29 \cdot (2 - 1)} = 0.932$$

Una vez tenemos los factores de corrección comenzamos a calcular el flujo de saturación de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} s_{th} &= s_0 \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} = 1900 \cdot 1 \cdot 0.932 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.9 \cdot 1 = \\ &= 1593.81 \frac{veh}{h \cdot carril} \end{aligned}$$

Continuamos calculando  $E_{L1}$  mediante la siguiente expresión:

$$E_{L1} = \frac{s_0}{s_p}$$

Donde:

- $E_{L1}$  = Número equivalente de vehículos de paso para giros a izquierda permitidos.
- $s_0$  = Flujo base de saturación (veh/h carril).
- $s_p$  = Flujo de saturación para giros a izquierda permitidos (veh/h carril).

Para ello necesitamos conocer el valor del flujo de saturación para giros a izquierda, que viene dado por la siguiente ecuación.

$$s_p = \frac{v_0 \cdot e^{-v_0 \cdot t_{cg}/3600}}{1 - e^{-v_0 \cdot t_{fh}/3600}}$$

Donde:

- $v_0$  = Flujo de demanda opuesto (si es 0 se toma el valor de 0.1 veh/h/carril).
- $t_{cg}$  = Avance crítico = 4.5 segundos.
- $t_{fh}$  = Avance = 2.5 segundos.

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores.

$$s_p = \frac{v_0 \cdot e^{-v_0 \cdot t_{cg}/3600}}{1 - e^{-v_0 \cdot t_{fh}/3600}} = \frac{0.1 \cdot e^{-0.1 \cdot 4.5/3600}}{1 - e^{-0.1 \cdot 2.5/3600}} = 1439.87 \text{ veh}/(h \cdot \text{carril})$$

$$E_{L1} = \frac{s_0}{s_p} = \frac{1900}{1439.87} = 1.3195$$

Nos queda el cálculo de  $f_{Lpb}$  que se realizará de igual manera que se calculo  $f_{Rpb}$  en el grupo de carriles 1.

i. Determinación del flujo de peatones durante su fase verde.

$$v_{pedg} = v_{ped} \cdot \frac{C}{g_{ped}} = 56 \cdot \frac{110}{20} = 308 \frac{\text{peatones}}{h} \leq 5000 \rightarrow ok$$

ii. Determinación de la ocupación media de los peatones.

Como el flujo horario de peatones durante la fase verde es menor que 1000, la ocupación media de estos se calcula mediante la siguiente expresión.

$$OCC_{pedg} = \frac{v_{pedg}}{2000} = \frac{308}{2000} = 0.154$$

iii. Determinación del flujo de bicicletas durante su indicación verde.

En el caso de la intersección que se está estudiando, el flujo de bicicletas es despreciable.

iv. Determinación de la ocupación media de las bicicletas

En el caso de la intersección que se está estudiando, el flujo de bicicletas es despreciable.

v. Determinación de la ocupación relevante de la zona de conflicto.

Para giros a la derecha sin interferencia de bicicletas, como es el caso se utiliza la siguiente ecuación:

$$OCC_r = \frac{g_{ped}}{g} \cdot OCC_{pedg} = \frac{20}{20} \cdot 0.154 = 0.154$$

Como se puede observar, debido a que la duración de la fase verde para los peatones coincide en esta intersección con la duración del verde efectivo de los vehículos (verde + ámbar), la ocupación relevante será equivalente a la ocupación anterior.

vi. Determinación del tiempo desocupado de la zona de conflicto.

Teniendo en cuenta que el número de carriles receptores de vehículos que realizan el giro es igual o menor al de carriles emisores, es decir, los vehículos no podrán esquivar a los peatones, el valor vendrá dado por la siguiente ecuación.

$$A_{pbT} = 1 - OCC_r = 1 - 0.154 = 0.846$$

vii. Determinación del factor de ajuste para el flujo de saturación.

Para determinar el valor definitivo del factor corrector para el flujo base de saturación se tendrá en cuenta que se trata de un giro a la izquierda realizado como operación permitida. Por lo que el valor de  $f_{Lpb}$  será igual al de  $A_{pbT}$

$$f_{Lpb} = A_{pbT} = 0.846$$

Para finalmente poder sustituir en la ecuación para obtener el flujo ajustado de saturación.

$$S_{sl3} = \frac{S_{th}}{1 + P_L \cdot \left( \frac{E_{L1}}{f_{Lpb}} - 1 \right)} = \frac{1593.81}{1 + \frac{9}{31} \cdot \left( \frac{1.3195}{0.846} - 1 \right)} = 1371.03 \frac{veh}{hora}$$

Conocido el valor del flujo ajustado de saturación se puede pasar a calcular la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde, debiendo definirse previamente al igual que en los casos anteriores el tipo de llegada.

Así pues, en este caso como en el anterior, podemos considerar que la llegada será tipo 2, pues entre el 40 y el 80 % de los vehículos llegan durante la fase roja a la intersección en grupos moderadamente densos. Esto supone que el valor del coeficiente de grupo sea de 0.67 de acuerdo al criterio del HCM, como se puede ver en la tabla 5 del presente TFM.

Por tanto, sabiendo que la duración de la fase verde para este semáforo es de 17 segundos y que el ciclo dura 110 segundos, el valor de la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde será el siguiente:

$$P = R_p \cdot \frac{g}{C} = 0.67 \cdot \frac{17}{110} = 0.1035$$

→ *El 10.35 % de los vehículos llega durante la fase verde*

Por último, antes de pasar al cálculo de los retrasos producidos en el grupo de carriles, debemos obtener el valor del ratio volumen capacidad de dicho grupo. Para ello será necesario calcular en primer lugar la capacidad de la intersección, empleando los valores del número de carriles que hay en el grupo (N), el flujo ajustado de saturación (s) y la duración de la fase verde (g) y del ciclo completo (C). Así, la capacidad en el grupo de carriles que estamos estudiando será:

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 1371.03 \cdot \frac{17}{110} = 211.9 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{31 \cdot \frac{60}{14.66}}{211.9} = 0.6$$

### **Retraso uniforme**

Los datos necesarios para la construcción de los polígonos de acumulación de colas son los mostrados en las tablas 85 y 86.

Tabla 85. Datos sobre la señalización. Acceso Noreste. Grupo de carriles 2.

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	17
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	90
Duración del ciclo	110

Tabla 86. Datos sobre la demanda. Acceso Noreste. Grupo de carriles 2.

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	31
Vehículos por ciclo	3,88
Media de vehículos en cola por ciclo	2,88
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	8,63

De este modo el polígono de acumulación de colas del grupo de carril que estamos estudiando es similar al del anterior grupo de carriles al tener el mismo tiempo en despejarse la cola, pero cuyo retraso será distinto ya que tiene una media de vehículos por ciclo menor que el carril anterior.

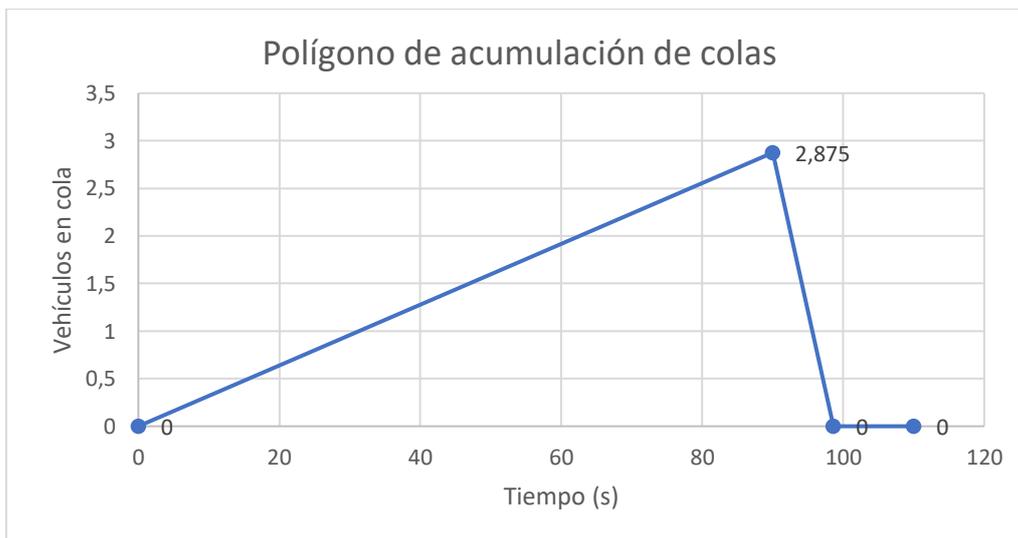


Ilustración 52. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº3. Acceso Noreste. Grupo de carriles 2. Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo como en los anteriores grupos de carriles.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(90 + 8.63) \cdot 2.875}{2} = 141.78 \text{ segundos}$$

$$Retraso\ uniforme = \frac{141.78}{3.88} = 36.54\ segundos/vehículo$$

### Retraso incremental

Para finalizar, se ha de calcular el valor del retraso incremental mediante la aplicación directa de la ecuación que se ha aplicado hasta ahora en el presente TFM, cuyos valores a introducir serán los de la tabla 87.

Tabla 87. Datos para retraso incremental. Intersección nº3. Acceso Noreste. Grupo de carriles 2

Duración del periodo de análisis (T)	0,2443 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,6
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	211,9 veh/h

Así, el valor del retraso incremental será el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.2443 \cdot \left[ (0.6 - 1) + \sqrt{(0.6 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.6}{211.9 \cdot 0.2443}} \right]$$

$$= 11.93\ segundos/vehículo$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del grupo de carriles 2 será de:

$$R = R_u + R_i = 36.54 + 11.93 = 48.47\ segundos/vehículo$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando tiene un Nivel de Servicio D.

Tabla 88. Resumen resultados. Acceso Noreste. Grupo de carriles 2. Intersección n°3

RESUMEN ACCESO NORESTE - GRUPO DE CARRILES 2	
Retraso (s /veh)	48,47
Ratio Vol - Cap	0,6
Nivel de servicio	NS D

### Grupo de carriles 3. Carril exclusivo para giro a izquierda permitido.

Este grupo de carriles que está formado por un carril exclusivo para el giro a izquierda de forma permitida también es un caso excepcional para el cual necesitamos el capítulo 31 del HCM para calcular el flujo ajustado de saturación, cuya expresión es la siguiente:

$$s_l = s_p \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} \cdot f_{Lpb}$$

Tomaremos como en los anteriores casos el flujo base de saturación  $s_0 = 1900 \frac{veh}{h \cdot carril}$ , y calcularemos el flujo de saturación para giros a izquierda como en el grupo de carriles 2.

$$s_p = \frac{v_0 \cdot e^{-v_0 \cdot t_{cg}/3600}}{1 - e^{-v_0 \cdot t_{fh}/3600}} = \frac{0.1 \cdot e^{-0.1 \cdot 4.5/3600}}{1 - e^{-0.1 \cdot 2.5/3600}} = 1439.87 \text{ veh}/(h \cdot carril)$$

Continuamos con el mismo factor de ajuste por ancho de carril  $f_w = 1$ .

Seguido del factor de ajuste por vehículos pesados, que sabiendo que en este carril el porcentaje de vehículos pesados es del 10.42 %.

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_{HV}(E_T - 1)} = \frac{100}{100 + 10.42 \cdot (2 - 1)} = 0.905$$

Como la inclinación de la rasante es del 0 %.

$$f_g = 1 - \frac{P_g}{200} = 1 - \frac{0}{200} = 1$$

Sabiendo que no hay plazas de aparcamiento en la zona de influencia de la intersección.

$$f_p = 1$$

Por otro lado, como no hay ninguna parada de autobús en la zona de influencia de la intersección el factor de corrección debido a las paradas de los vehículos de transporte urbano será unitario.  $f_{bb} = 1$ .

El factor de ajuste por tipo de área y el de ajuste por uso de carril siguen siendo los mismos,  $f_a = 0.9$  y  $f_{LU} = 1$ .

Nos queda el cálculo de  $f_{Lpb}$ , que al ser exactamente igual que en el grupo de carriles 2, tomamos su mismo valor.

$$f_{Lpb} = 0.846$$

Una vez tenemos todos podemos sustituir en la ecuación para el cálculo del flujo ajustado de saturación.

$$\begin{aligned} s_l &= s_p \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} \cdot f_{Lpb} \\ &= 1439.87 \cdot 1 \cdot 0.905 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.9 \cdot 1 \cdot 0.846 = 992.16 \text{ veh/hora} \end{aligned}$$

Como en los anteriores grupos de carriles de este acceso, tiene un tipo de llegada 2 en el que el 10.35 % de los vehículos llega durante la fase verde, es decir, la mayoría de los vehículos llega cuando el semáforo está en rojo.

Conocidos los datos anteriores, pasamos al cálculo de los retrasos, para lo cual comenzamos calculando la capacidad del grupo de carriles.

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 992.16 \cdot \frac{17}{110} = 153.3 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{11 \cdot \frac{60}{14.66}}{153.3} = 0.3$$

### Retraso uniforme

Para el cálculo del retraso uniforme es necesaria la construcción de los polígonos de acumulación de colas, para lo que debemos emplear los siguientes datos:

Tabla 89. Datos sobre la señalización. Acceso Noreste. Grupo de carriles 3.

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	17
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	90
Duración del ciclo	110

Tabla 90. Datos sobre la demanda. Acceso Noreste. Grupo de carriles 3.

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	11
Vehículos por ciclo	1,38
Media de vehículos en cola por ciclo	1,00
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	3,00

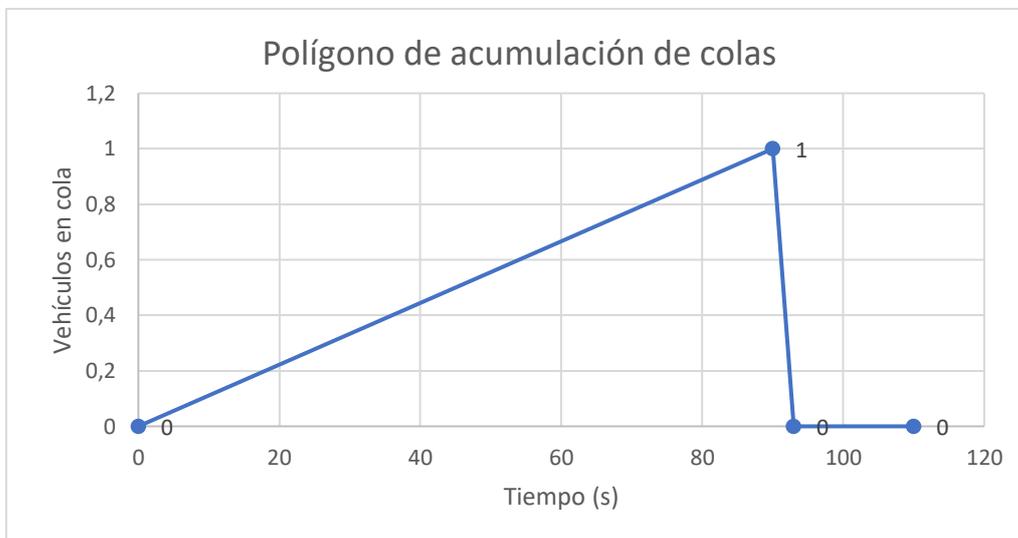


Ilustración 53. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº3. Acceso Noreste. Grupo de carriles 3. Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo como en los anteriores grupos de carriles.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(90 + 3) \cdot 1}{2} = 46.5 \text{ segundos}$$

$$\text{Retraso uniforme} = \frac{46.5}{1.38} = 33.69 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso incremental

Por otro lado, debemos calcular el valor del retraso incremental, el cual se obtendrá mediante la aplicación directa de una ecuación cuyos valores a introducir se muestran en la tabla 91.

Tabla 91. Datos para retraso incremental. Intersección n°3. Acceso Noreste. Grupo de carriles 3

Duración del periodo de análisis (T)	0,2443 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,3
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	153,3 veh/h

Así, el valor del retraso incremental será el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.2443 \cdot \left[ (0.3 - 1) + \sqrt{(0.3 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.3}{153.3 \cdot 0.2443}} \right]$$

$$= 4.95 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del carril exclusivo del acceso Noreste será de:

$$R = R_u + R_i = 33.69 + 4.95 = 38.64 \text{ segundos/vehículo}$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando tiene un Nivel de Servicio D.

Tabla 92. Resumen resultados. Acceso Noreste. Grupo de carriles 3. Intersección n°3

RESUMEN ACCESO NORESTE - GRUPO DE CARRILES 3	
Retraso (s /veh)	38,64
Ratio Vol - Cap	0,3
Nivel de servicio	NS D

### Estudio del acceso Noroeste. Calle Torre de Romo

El acceso Noroeste dispone únicamente de un carril compartido que permite el movimiento de paso y el giro a derecha permitido, con lo cual lo calcularemos como el grupo de carriles 1 del acceso Noreste.



*Ilustración 54. Intersección nº3. Acceso Noroeste. Fuente: Elaboración propia*

Como puede verse en la ilustración 48 y como se ha comentado anteriormente, este acceso dispone de un grupo de movimiento y de un solo grupo de carriles permitiendo continuar por la calle Torre de Romo o girar a la derecha hacia la calle Alameda de los Capuchinos.

**Grupo de carriles 1. Carril compartido de paso y giro a derecha permitido.**

Sabiendo que se ha considerado un 6.25 % de los vehículos registrados como pesados, que se producen un aparcamiento por hora en la zona adyacente y que interfieren 8 peatones cada hora los movimientos de giro a la derecha, se ha elaborado una tabla con los resultados del procedimiento para calcular el factor ajustado de saturación ya que es el mismo que el del grupo de carriles 1 del acceso Noreste.

Tabla 93. Datos para el cálculo del flujo de saturación ajustado. Intersección n°3. Acceso Noroeste. Grupo de carriles 1

Datos para el cálculo del flujo de saturación ajustado	
Flujo base de saturación $s_0$ (veh/h/carril)	1900
Factor de ancho de carril $f_w$	1
Factor de vehículos pesados $F_{HV}$	0,9411
Factor por inclinación de la rasante $f_g$	1
Factor por aparcamiento $f_p$	0,895
Factor de ajuste por bloque de autobuses $f_{bb}$	1
Factor por tipo de área $f_a$	0,9
Factor por utilización de carril $F_{LU}$	1
Flujo de saturación para mov. Paso $s_{th}$ (veh/h/carril)	1440,31
Proporción de vehículos que gira a derecha $P_R$	0,1025
Probabilidad de cambio de carril $P_{lc}$	0,5385
Factor de equivalencia afectado por peatones $E_{R,m}$	1,103

Una vez tenemos todo podemos sustituir en la ecuación para el cálculo del flujo ajustado de saturación.

$$s_{sr} = \frac{s_{th}}{1 + P_R \cdot (E_{R,m} - 1)} = \frac{1440.31}{1 + \frac{4}{39} \cdot (1.103 - 1)} = 1425.25 \text{ veh/hora}$$

Conocido el valor del flujo ajustado de saturación se puede pasar a calcular la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde, debiendo definirse previamente al igual que en los casos anteriores el tipo de llegada.

Así pues, en el caso que estamos estudiando, podemos considerar que la llegada será tipo 4, pues entre el 40 y el 80 % de los vehículos llegan durante la fase verde a la intersección. Esto supone que el valor del coeficiente de grupo sea de 1.33 de acuerdo al criterio del HCM, como se puede ver en la tabla 5 del presente TFM.

Por tanto, sabiendo que la duración de la fase verde para este semáforo es de 43 segundos y que el ciclo dura 110 segundos, el valor de la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde será el siguiente:

$$P = R_p \cdot \frac{g}{C} = 1.33 \cdot \frac{43}{110} = 0.5199$$

→ El 51.99 % de los vehículos llega durante la fase verde

El siguiente paso es el cálculo de la capacidad de la intersección, la cual se obtiene mediante la siguiente expresión como ya se ha visto anteriormente.

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 1425.25 \cdot \frac{43}{110} = 557.14 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{39 \cdot \frac{60}{14.66}}{557.14} = 0.286$$

### Retraso uniforme

Para el cálculo del retraso uniforme es necesaria la construcción de los polígonos de acumulación de colas, para lo que debemos emplear los valores de las tablas 94 y 95.

*Tabla 94. Datos sobre la señalización. Acceso Noroeste. Grupo de carriles 1.*

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	43
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	63
Duración del ciclo	110

*Tabla 95. Datos sobre la demanda. Acceso Noroeste. Grupo de carriles 1.*

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	39
Vehículos por ciclo	4,88
Media de vehículos en cola por ciclo	2,75
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	8,25

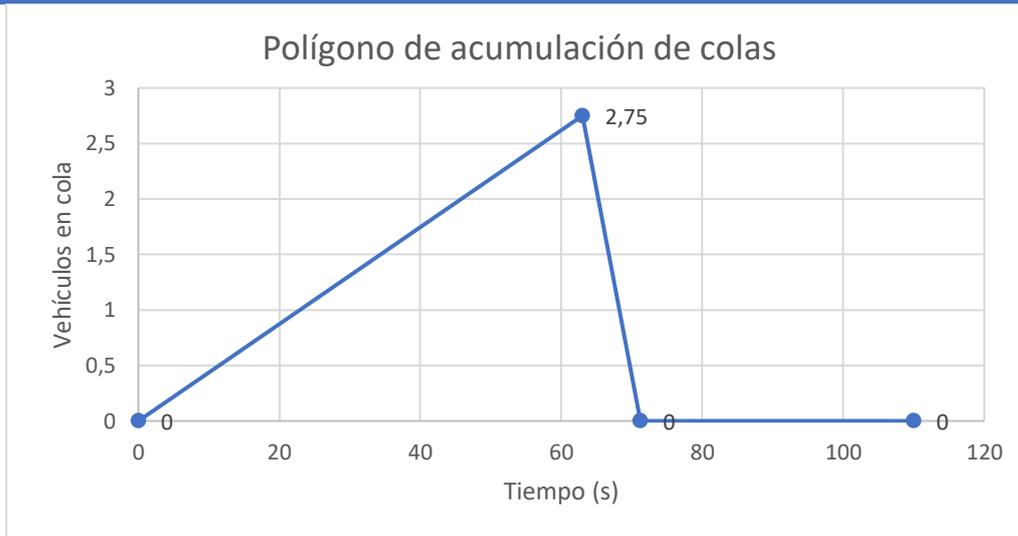


Ilustración 55. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº3. Acceso Noroeste. Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo como en los anteriores grupos de carriles.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(63 + 70) \cdot 2.75}{2} = 97.97 \text{ segundos}$$

$$\text{Retraso uniforme} = \frac{97.97}{4.88} = 20.07 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso incremental

Por otro lado, debemos calcular el valor del retraso incremental, el cual se obtendrá mediante la aplicación directa de una ecuación en la cual se han de emplear los siguientes valores:

Tabla 96. Datos para retraso incremental. Intersección nº3. Acceso Noroeste. Grupo de carriles 1

Duración del periodo de análisis (T)	0,2443 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,286
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	557,14 veh/h

Así, el valor del retraso incremental será el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.2443 \cdot \left[ (0.286 - 1) + \sqrt{(0.286 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.286}{557.14 \cdot 0.2443}} \right]$$

$$= 1.28 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del grupo de carriles 1 será de:

$$R = R_u + R_i = 20.07 + 1.28 = 21.35 \text{ segundos/vehículo}$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando tiene un Nivel de Servicio C.

Tabla 97. Resumen resultados. Acceso Noroeste. Grupo de carriles 1. Intersección nº3

RESUMEN ACCESO NOROESTE - GRUPO DE CARRILES 1	
Retraso (s /veh)	21,35
Ratio Vol - Cap	0,286
Nivel de servicio	NS C

### Estudio del acceso Sureste. Calle Torre de Romo

Este acceso posee 2 carriles, el de la izquierda permite el giro a izquierda exclusivamente como ya se ha comentado anteriormente y nace unos 50 metros antes de la línea de detención del semáforo, siendo el de la derecha el que utilizado para realizar los movimientos de paso y giro a derecha en modo permitido como se puede ver en la ilustración 50. Así que, en este caso tendremos:

- Grupo de carriles 1: Carril exclusivo de giro a izquierda.
- Grupo de carriles 2: Carril compartido de paso y giro a derecha permitido.



Ilustración 56. Intersección nº3. Acceso Sureste. Fuente: Elaboración propia

### Grupo de carriles 1. Carril compartido de paso y giro a derecha permitido.

Como el procedimiento del cálculo del flujo ajustado de saturación es similar al del grupo de carriles 1 del acceso Noreste, se hará una tabla (véase la tabla 98) con los resultados de los parámetros utilizados.

Tabla 98. Datos para el cálculo del flujo de saturación ajustado. Intersección nº3. Acceso Sureste. Grupo de carriles 1

Datos para el cálculo del flujo de saturación ajustado	
Flujo base de saturación $s_0$ (veh/h/carril)	1900
Factor de ancho de carril $f_w$	1
Factor de vehículos pesados $F_{HV}$	0,913
Factor por inclinación de la rasante $f_g$	1
Factor por aparcamiento $f_p$	1
Factor de ajuste por bloque de autobuses $f_{bb}$	0,968
Factor por tipo de área $f_a$	0,9
Factor por utilización de carril $F_{LU}$	1
Flujo de saturación para mov. Paso $s_{th}$ (veh/h/carril)	1511,27
Proporción de vehículos que gira a derecha $P_R$	0,111
Probabilidad de cambio de carril $P_{lc}$	0,7676
Factor de equivalencia afectado por peatones $E_{R,m}$	1,1453

Para llegar a estos resultados se ha tomado un 9.52 % de vehículos pesados, que se producen 8 paradas de autobús cada hora y que 12 peatones a la hora se interponen a la hora de realizar el giro hacia la calle Mozart.

Una vez tenemos todo podemos sustituir en la ecuación para el cálculo del flujo ajustado de saturación.

$$s_{sr} = \frac{s_{th}}{1 + P_R \cdot (E_{R,m} - 1)} = \frac{1511.27}{1 + \frac{7}{63} \cdot (1.1453 - 1)} = 1487.25 \text{ veh/hora}$$

Así pues, en el caso que estamos estudiando, podemos considerar que la llegada será tipo 4, pues entre el 40 y el 80 % de los vehículos llegan durante la fase verde a la intersección. Esto supone que el valor del coeficiente de grupo sea de 1.33 de acuerdo al criterio del HCM, como se puede ver en la tabla 5 del presente TFM.

Por tanto, sabiendo que la duración de la fase verde para este semáforo es de 43 segundos y que el ciclo dura 110 segundos, el valor de la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde será el siguiente:

$$P = R_p \cdot \frac{g}{C} = 1.33 \cdot \frac{77}{110} = 0.931$$

→ El 93.1 % de los vehículos llega durante la fase verde

Conocidos los datos anteriores, pasamos al cálculo de los retrasos, para lo cual comenzamos calculando la capacidad del grupo de carriles.

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 1487.25 \cdot \frac{77}{110} = 1041.1 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{63 \cdot \frac{60}{14.66}}{1041.1} = 0.247$$

### Retraso uniforme

Para el cálculo del retraso uniforme es necesaria la construcción de los polígonos de acumulación de colas, para lo que debemos emplear los datos de las tablas 99 y 100.

Tabla 99. Datos sobre la señalización. Acceso Sureste. Grupo de carriles 1.

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	84
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	23
Duración del ciclo	110

Tabla 100. Datos sobre la demanda. Acceso Sureste. Grupo de carriles 1.

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	63
Vehículos por ciclo	7,88
Media de vehículos en cola por ciclo	0,13
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	0,38

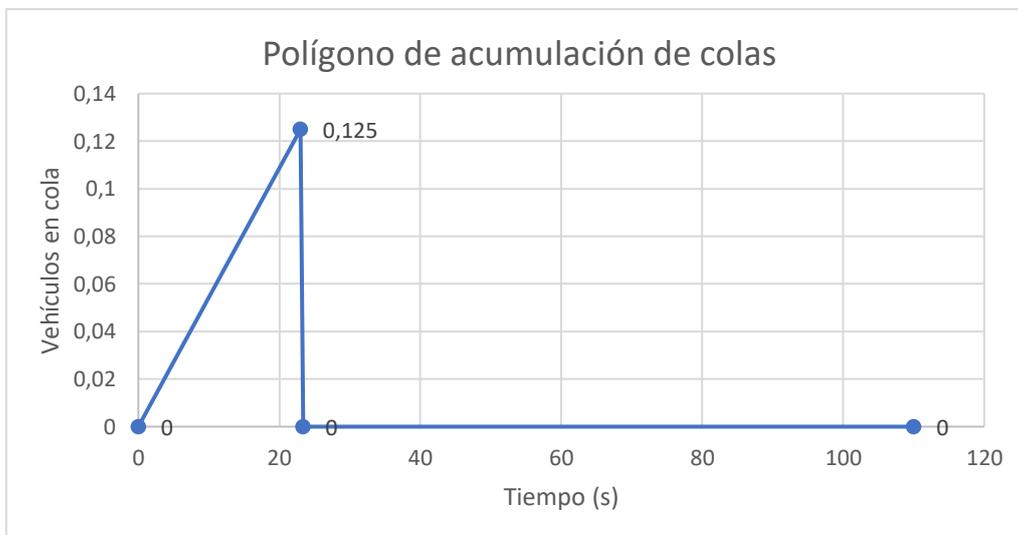


Ilustración 57. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº3. Acceso Sureste. Grupo de carriles 1. Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo como en los anteriores grupos de carriles.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(23 + 0,38) \cdot 0,125}{2} = 1,46 \text{ segundos}$$

$$\text{Retraso uniforme} = \frac{1,46}{7,88} = 0,18 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso incremental

Por otro lado, debemos calcular el valor del retraso incremental, el cual se obtendrá mediante la aplicación directa de una ecuación cuyos valores a introducir se muestran en la tabla 101.

Tabla 101. Datos para retraso incremental. Intersección nº3. Acceso Sureste. Grupo de carriles 1

Duración del periodo de análisis (T)	0,2443 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,247
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	1041,1 veh/h

Así, el valor del retraso incremental será el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.2443 \cdot \left[ (0.247 - 1) + \sqrt{(0.247 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.247}{1041.1 \cdot 0.2443}} \right]$$

$$= 0.56 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del carril exclusivo del acceso Noreste será de:

$$R = R_u + R_i = 0.18 + 0.56 = 0.74 \text{ segundos/vehículo}$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando tiene un Nivel de Servicio A.

Tabla 102. Resumen resultados. Acceso Sureste. Grupo de carriles 1. Intersección nº3

RESUMEN ACCESO SURESTE - GRUPO DE CARRILES 1	
Retraso (s /veh)	0,74
Ratio Vol - Cap	0,247
Nivel de servicio	NS A

**Grupo de carriles 2. Carril exclusivo de giro a izquierda protegido.**

El procedimiento para calcular el flujo ajustado de saturación es parecido al usado en el grupo de carriles 3 del acceso Noreste, pero en este caso los peatones no interrumpen el movimiento de giro a izquierda.

Los factores para el cálculo del flujo ajustado de saturación sabiendo que no se han registrado vehículos pesados y la parada de autobús no influye en este carril, son los que se muestran en tabla 103.

*Tabla 103. Datos para el cálculo del flujo de saturación ajustado. Intersección nº3. Acceso Sureste. Grupo de carriles 2*

Datos para el cálculo del flujo de saturación ajustado	
Flujo base de saturación $s_0$ (veh/h/carril)	1900
Factor de ancho de carril $f_w$	1
Factor de vehículos pesados $F_{HV}$	1
Factor por inclinación de la rasante $f_g$	1
Factor por aparcamiento $f_p$	1
Factor de ajuste por bloque de autobuses $f_{bb}$	1
Factor por tipo de área $f_a$	0,9
Factor por utilización de carril $F_{LU}$	1
Factor de giros a izquierda protegidos $F_{LT}$	0,952

$$s = s_0 \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} \cdot f_{LT} = 1900 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.9 \cdot 1 \cdot 0.952 = 1627.92 \text{ veh/hora}$$

Como en el acceso Noreste, podemos considerar que la llegada será de tipo 2, pues entre el 40 y el 80 % de los vehículos llegan durante la fase roja a la intersección. Esto supone que el valor del coeficiente de grupo sea de 0.67 de acuerdo al criterio del HCM, como se puede ver en la tabla 5 del presente TFM.

Por tanto, sabiendo que la duración de la fase verde para este semáforo es de 34 segundos y que el ciclo dura 110 segundos, el valor de la proporción de vehículos que llegan durante la fase verde será el siguiente:

$$P = R_p \cdot \frac{g}{C} = 0.67 \cdot \frac{34}{110} = 0.207$$

→ El 20.7 % de los vehículos llega durante la fase verde

Tras haber obtenido los datos anteriores, podemos pasar al cálculo de los retrasos, por lo que comenzaremos calculado la capacidad del carril, como se hizo en los anteriores casos.

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} = 1 \cdot 1627.92 \cdot \frac{34}{110} = 503.17 \text{ veh/h}$$

Por tanto, la relación volumen-capacidad del grupo será:

$$X = \frac{v}{c} = \frac{9 \cdot \frac{60}{14}}{503.17} = 0.076$$

### Retraso uniforme

Los datos necesarios para la construcción de los polígonos de acumulación de colas son los mostrados en las tablas 104 y 105.

*Tabla 104. Datos sobre la señalización. Acceso Sureste. Grupo de carriles 2.*

Información sobre señalización (s)	
Duración fase verde	34
Duración fase ámbar	3
Duración fase rojo	73
Duración del ciclo	110

*Tabla 105. Datos sobre la demanda. Acceso Sureste. Grupo de carriles 2.*

Información sobre demanda (vehículos)	
Vehículos en el periodo de análisis	9
Vehículos por ciclo	1,13
Media de vehículos en cola por ciclo	0,875
Tiempo medio que tardaba en deshacerse la cola (s)	2,63

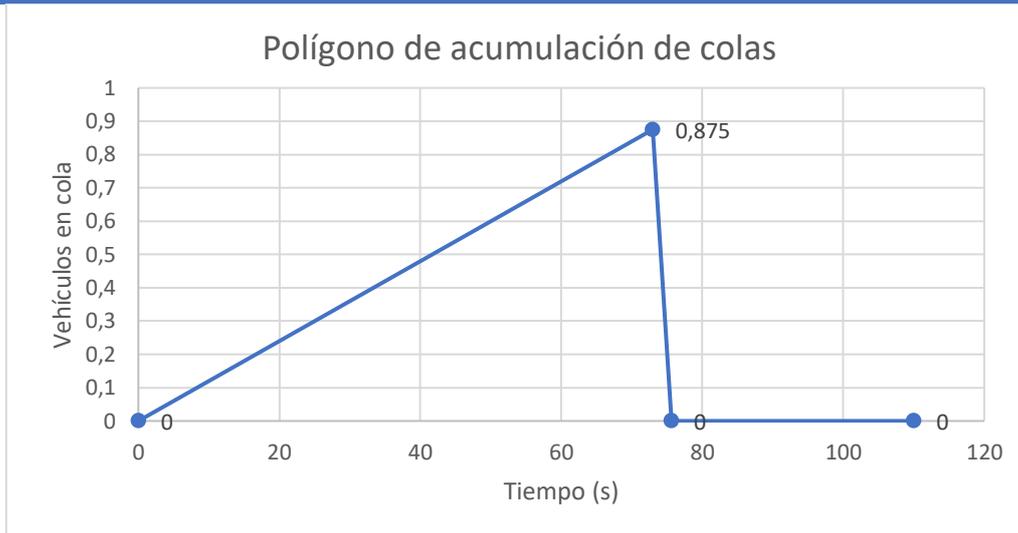


Ilustración 58. Gráfica polígono de acumulación de colas. Intersección nº3. Acceso Sureste. Grupo de carriles 2.  
Fuente: Elaboración propia

Conocido el polígono, para calcular el valor del retraso uniforme únicamente hay que calcular el área que éste encierra y dividirla por el número medio de vehículos por ciclo como en los anteriores grupos de carriles.

$$\text{Área encerrada} = \frac{(73 + 2.63) \cdot 0.875}{2} = 33.08 \text{ segundos}$$

$$\text{Retraso uniforme} = \frac{33.08}{1.13} = 29.28 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso incremental

Para finalizar, se ha de calcular el valor del retraso incremental mediante la aplicación directa de la ecuación que se ha aplicado hasta ahora en el presente TFM, cuyos valores a introducir serán los de la tabla 106.

Tabla 106. Datos para retraso incremental. Intersección nº3. Acceso Sureste. Grupo de carriles 2

Duración del periodo de análisis (T)	0,2443 horas
Ratio volumen - capacidad (X)	0,076
Factor k	0,5
Factor de señalización anterior (I)	1
Capacidad (c)	503,17 veh/h

Así, el valor del retraso incremental será el siguiente:

$$R_i = 900 \cdot T \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot X}{c \cdot T}} \right]$$

$$R_i = 900 \cdot 0.2443 \cdot \left[ (0.076 - 1) + \sqrt{(0.076 - 1)^2 + \frac{8 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 0.076}{503.17 \cdot 0.2443}} \right]$$

$$= 0.29 \text{ segundos/vehículo}$$

### Retraso total

Por tanto, el valor del retraso total generado para los usuarios del grupo de carriles 2 será de:

$$R = R_u + R_i = 29.28 + 0.29 = 29.57 \text{ segundos/vehículo}$$

Finalmente, podemos obtener el nivel de servicio prestado por el grupo de carriles empleando la tabla mostrada en el capítulo 3 del presente TFM en la tabla 8, en función de los retrasos y del ratio Volumen-Capacidad, de la que concluimos que el grupo de carriles que estamos estudiando tiene un Nivel de Servicio C.

Tabla 107. Resumen resultados. Acceso Sureste. Grupo de carriles 2. Intersección nº3

RESUMEN ACCESO SURESTE - GRUPO DE CARRILES 2	
Retraso (s /veh)	29,57
Ratio Vol - Cap	0,076
Nivel de servicio	NS C

### Estudio conjunto de la intersección nº3.

Para finalizar con el análisis de la tercera intersección, se puede realizar un estudio conjunto de todos los accesos de la misma. El HCM propone 3 tipos de procedimientos o hipótesis como pudimos ver en las anteriores intersecciones.

**Procedimiento 1:** Se fija el peor nivel de servicio de todos los carriles observados individualmente. De este modo, el resultado sería que la intersección estaría actuando bajo un **NS E**, ya que en uno de sus accesos presenta un carril con este nivel de servicio con un retraso equivalente de 71.13 segundos por vehículo, concretamente en el acceso Noreste en el grupo de carriles 1.

**Procedimiento 2:** Se realiza una media aritmética de los retrasos de todos los grupos de carriles estudiados, el valor obtenido para la intersección globalmente sería el siguiente.

*Tabla 108. Retraso medio. Intersección nº3*

Retraso del Acceso Noreste - Grupo 1 - Carril compartido	71,13	seg/veh
Retraso del Acceso Noreste - Grupo 2 - Carril compartido	48,47	seg/veh
Retraso del Acceso Noreste - Grupo 3 - Carril exclusivo	38,64	seg/veh
Retraso del Acceso Noroeste - Grupo 1 - Carril compartido	21,35	seg/veh
Retraso del Acceso Sureste - Grupo 1 - Carril compartido	0,74	seg/veh
Retraso del Acceso Sureste - Grupo 2 - Carril exclusivo	29,57	seg/veh
Retraso medio	<b>34,98</b>	<b>seg/veh</b>
<b>Nivel de servicio de la intersección</b>	<b>NS C</b>	

Estrictamente tendría un nivel de servicio C, pero dado que le faltan 2 centésimas de segundo para entrar en el rango del nivel de servicio D, lo más adecuado sería decir que el nivel de servicio medio de la intersección es **NS D**.

**Procedimiento 3:** Este procedimiento se corresponde con el modo recomendado por el HCM, el cual consiste en calcular el nivel de servicio de la intersección mediante la realización de una media del retraso producido en cada uno de los grupos de carriles, ponderada por el volumen de usuarios de dicho carril. De este modo, el nivel de servicio global de la intersección sería el siguiente.

*Tabla 109. Retraso ponderado. Intersección nº3*

	Retraso (seg/veh)	Volumen (veh)
Retraso del Acceso Noreste - Grupo 1 - Carril compartido	71,13	37
Retraso del Acceso Noreste - Grupo 2 - Carril compartido	48,47	31
Retraso del Acceso Noreste - Grupo 3 - Carril exclusivo	38,64	11
Retraso del Acceso Noroeste - Grupo 1 - Carril compartido	21,35	39
Retraso del Acceso Sureste - Grupo 1 - Carril compartido	0,74	63
Retraso del Acceso Sureste - Grupo 2 - Carril exclusivo	29,57	9
Retraso ponderado	<b>30,03</b>	
<b>Nivel de servicio de la intersección</b>	<b>NS C</b>	

### **Conclusiones sobre la intersección nº3**

Tras la realización del estudio referente a la intersección nº3 y, al igual que se hizo en las intersecciones anteriores, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los tiempos de las fases verdes están desequilibrados, ya que el del acceso Noreste tiene una duración de 20 segundos con un volumen registrado de 79

vehículos durante el periodo de estudio, mientras que el grupo de carriles 1 del acceso Sureste con un total de 63 vehículos contabilizados disponen de una fase verde de 77 segundos, es decir, casi el cuádruple que el del acceso Noreste y teniendo menos volumen de tráfico rodado.

- Relacionado con el aspecto anterior el grupo de carriles 1 del acceso Noreste, además de tener poco tiempo de indicación verde, su giro a derecha se ve interrumpido por los peatones que cruzan el acceso Noroeste en el cual se ha registrado un elevado volumen perjudicando bastante la capacidad de este carril, que es el único que permite el giro a derecha y hace que se alcance un retraso de 71.13 segundos por vehículo, que es una cifra muy elevada.
- Una vez visto el tráfico que discurre por cada acceso, parece lógico pensar que el modelo de la intersección en 3 fases no es el adecuado, ya que la tercera fase se produce para que se pueda hacer un giro a izquierda protegido desde un carril exclusivo, pero viendo el volumen de tráfico que discurre por el flujo opuesto parece indicar que esta tercera fase no es necesaria y que con 2 sería suficiente, porque sólo 9 vehículos realizaron este giro a izquierda y teniendo un carril exclusivo para este giro, por lo que no entorpecería a los vehículos que quieren realizar el movimiento de paso o el giro a derecha y por el flujo opuesto no hay un gran volumen de tráfico que se oponga a que desde este carril exclusivo se realice el giro.

# **CAPÍTULO 5. PROPUESTAS DE** **MEJORA**

## **5. PROPUESTAS DE MEJORA**

En este apartado en primer lugar se realizará un modelo de cada una de las intersecciones objeto de estudio a partir de los datos tomados en campo, una vez se tenga el modelo de la intersección se realizará una simulación para verificar que los resultados están cercanos a los obtenidos mediante el análisis realizado con el HCM anteriormente, como el programa AnyLogic no puede dar directamente el valor del retraso medio de los vehículos en la intersección, se utilizará un parámetro similar que sí podemos obtener, es el tiempo en el sistema (la zona de la intersección añadiéndole unos metros más de cada ramal que accede a ella) de los vehículos, es decir, el tiempo desde que cada vehículo en el sistema entra hasta que sale de él, ésta es la función que se tratará de minimizar a la hora de optimizar los tiempos de los ciclos de las intersecciones semaforizadas siendo semejante esta función a la que realizaría el semáforo accionado por el tráfico que se pretende utilizar.

Una vez verificado el modelo se pasará a hacer un experimento de optimización en el programa donde los tiempos de los ciclos (verde, ámbar y rojo) pasarán a ser variables y proporcionando al programa unos valores mínimos, máximos y el valor de paso, es decir, el valor con el cual el programa probara una iteración y al que se le añadirá en la siguiente iteración para obtener los valores de las variables que minimizan el tiempo que pasan los vehículos de media en el sistema. Estos valores se compararán con los que existen en la realidad y se obtendrán una serie de conclusiones.

### **5.1. INTERSECCIÓN N°1**

Comenzaremos realizando el modelo de la intersección en AnyLogic, que tiene el aspecto que se puede ver en la ilustración 59, donde están representados en la imagen los posibles giros en líneas discontinuas, los pasos de peatones en color verde, las zonas por donde discurrirán los peatones en color naranja, además de disponer las zonas de aparcamientos en el acceso norte y como el programa no permitía la creación de una parada de autobús sin refugio, se ha modelizado con una línea de detención exclusiva para el autobús en la que se detiene un tiempo determinado para simular su funcionamiento real.



*Ilustración 59. Representación gráfica del modelo de la intersección n°1 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.*

Además de esta representación gráfica para realizar el modelo de la intersección se ha elaborado el diagrama de flujo que describe el comportamiento del modelo, como se puede ver en la ilustración 60 está en cada acceso se parte con carSource que es el que genera la cantidad de vehículos que se desee, a continuación hay un selectOutput donde se encuentran los posibles destinos de los vehículos que se han generado al principio del tramo y que se distribuyen con una probabilidad asignada, que en este caso es la tomada en los datos de campo, después se encuentran los carMoveTo que están relacionados con la dirección de salida del sistema y por último un carDispose donde los vehículos salen del sistema.

El sistema del autobús es similar solo que se le añade una parada donde se le asigna un tiempo de parada con una probabilidad triangular para que no siempre tenga el mismo tiempo de parada, sino que oscile como puede suceder en la vida real.

En el caso de los peatones primeramente hay que designar la zona por donde discurrirán, para eso hay que crear una zona cerrada mediante una especie de muros como se puede

ver en la representación gráfica del modelo en la ilustración 59, teniendo una línea de salida designada por pedSource, que al igual que en los vehículos genera una densidad de peatones determinada que se dirigen hacia otra línea de salida fijada por pedGoTo y finalmente salen del sistema mediante un pedSink.

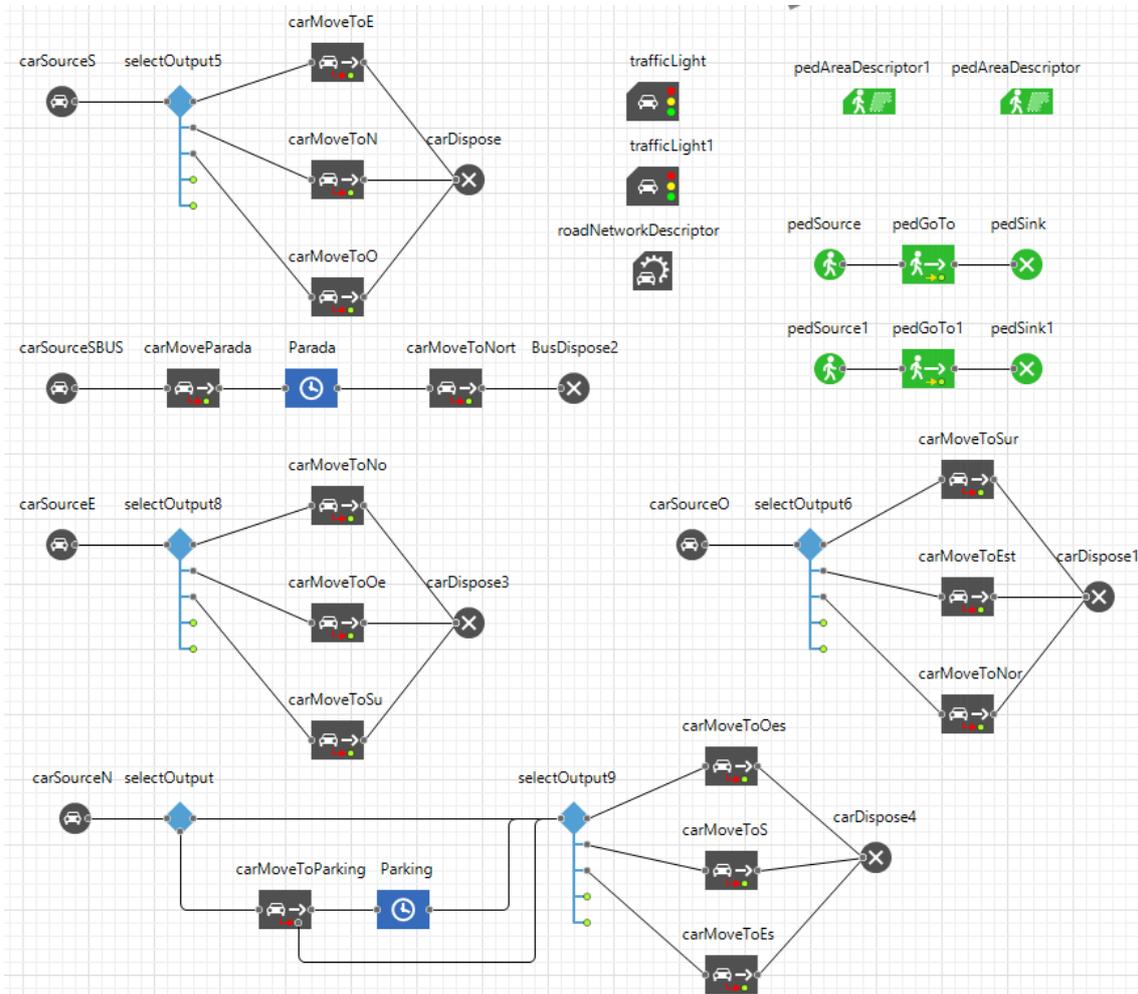


Ilustración 60. Diagrama de flujo del modelo de la intersección n°1 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.

Los semáforos se modelan mediante los trafficLight donde se pueden asignar los tiempos de duración de las fases verde, ámbar y roja. Posteriormente estos valores serán tomados como variables para optimizar el sistema buscando minimizar el tiempo de los vehículos en el sistema. Una captura de la simulación del modelo con los semáforos en funcionamiento puede verse en la ilustración 61.



*Ilustración 61. Simulación del modelo de la intersección nº1 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.*

En cuanto a la zona de aparcamientos se modela primeramente con un selectOutput donde se designa una probabilidad de que los vehículos quieran ir a la zona de aparcamientos, con un carMoveTo se define que el vehículo se dirija a la zona de aparcamientos y en caso de que la zona este llena estos continúan por su camino, los vehículos que si acceden a la zona de aparcamiento realizan la maniobra y aparcan, el tiempo que estos permanecen aparcados depende del asignado mediante probabilidad triangular en el icono de Parking.

Finalmente, con el roadNetworkDescriptor se nos permite observar el mapa de densidad de la intersección en función de la velocidad media de los vehículos en la zona, en el caso de la ilustración 62 se realizó una simulación de una hora con los datos tomados en campo, en el cual puede verse que hay una mayor concentración de vehículos con poca velocidad en los accesos este y oeste, que son los más saturados de la intersección como pudo verse al hacer los cálculos de retraso medio por vehículo según la metodología del HCM.

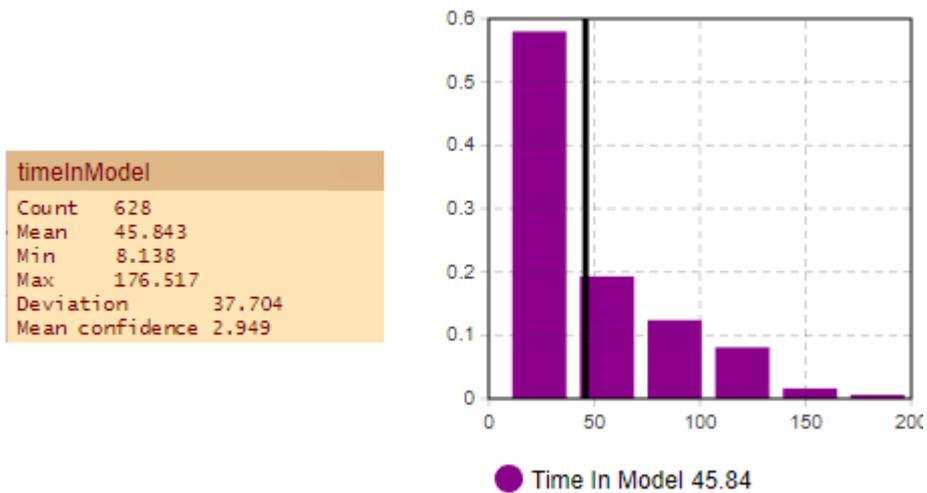


Ilustración 62. Mapa de densidad de la intersección nº1 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.

Una vez tenemos el modelo se realiza la simulación para verificar que los datos simulados se corresponden con los de la realidad.

Tras 1 hora de simulación los datos arrojados por el programa son los siguientes:

Tabla 110. Tiempo en el sistema de la intersección nº1.



Como se puede ver en la tabla 110, durante la hora de simulación han pasado 628 vehículos por la intersección, la media de tiempo de los vehículos en el sistema es de 45 segundos, tras realizar varias simulaciones este valor varía entre los 44, 45 y 46 segundos, siendo el valor mínimo en este caso de 8 segundos, en el cual suponemos que el vehículo pasó por la intersección sin detenerse en ningún momento, y el máximo de 176 segundos, esta situación seguro que se ha producido en el acceso este u oeste donde hay ciclos en los que un vehículo se queda sin poder pasar durante un ciclo completo y tiene que esperar de nuevo otro ciclo entero para poder pasar, siendo este una de las consecuencias de la mala regulación del semáforo.

Si al valor medio de tiempo en el sistema le restamos el valor mínimo, suponiendo que este es el tiempo que tarda un vehículo en recorrer la intersección obtendremos el valor de retraso medio que debe estar muy cercano del calculado anteriormente por el método del HCM. En este caso el valor medio de tiempo en el sistema es de 45 segundos y el valor mínimo de 8 segundos, haciendo la resta obtenemos un valor de retraso medio de 37 segundos, que como se puede ver en la tabla 36 está muy cercano a los 36 segundos que nos daba como resultado utilizando el procedimiento del HCM, con lo que se puede decir que el modelo queda verificado.

Ahora que ya tenemos verificado el modelo, el siguiente paso es adaptar los tiempos de los ciclos de los semáforos a la intensidad de vehículos que llega a ellos, reduciendo el tiempo en el sistema de los vehículos.

Para ello, los ciclos verde y rojo de los semáforos los transformamos en variables y hacemos un experimento de optimización para minimizar el tiempo en el sistema de los vehículos, pasando de los actuales ya expuestos en la tabla 14 a los de la tabla 112.

Tabla 111. Fases de señalización de la intersección nº1. Fuente: Elaboración propia

	Planilla duración del ciclo (s)		
	Verde	Ámbar	Rojo
Fase 1	40	3	24
Fase 2	15	3	49

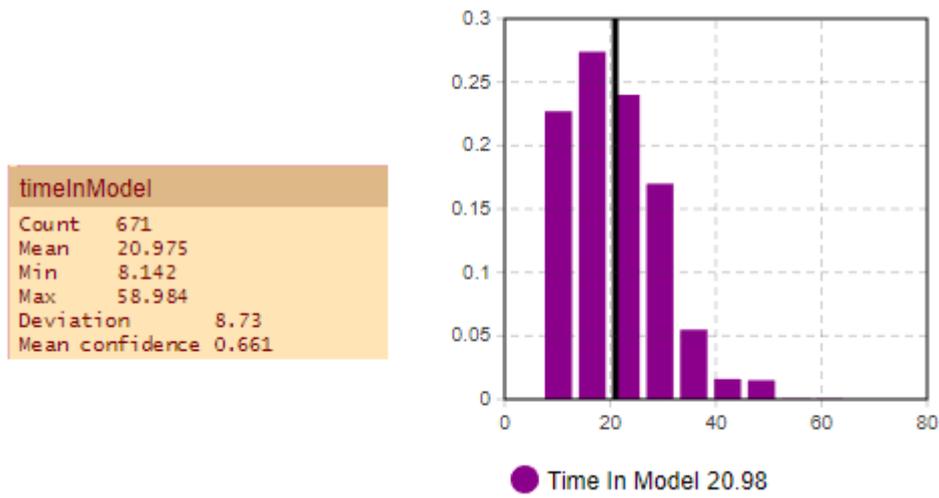
Tabla 112. Fases de señalización optimizadas de la intersección nº1. Fuente: Elaboración propia

	Planilla duración del ciclo optimizado (s)		
	Verde	Ámbar	Rojo
Fase 1	10	3	12
Fase 2	12	3	10

Como se puede observar en la tabla 112, los valores de las fases se han reducido y homogeneizado, teniendo una duración total del ciclo de 25 segundos, permitiendo el paso más alternativo y fluido que en la situación actual.

En esta situación, tras 1 hora de simulación los datos arrojados por el programa son los siguientes:

Tabla 113. Tiempo en el sistema optimizado de la intersección n°1.



En esta simulación han pasado 671 vehículos, con una media de tiempo en el sistema de casi 21 segundos, que restándole el tiempo mínimo queda una duración de retraso medio de casi 12 segundos, con lo cual se ha conseguido reducir 25 segundos por vehículo de media, lo que hace una reducción del 67,56 % de la demora. Además, el tiempo máximo en el sistema es de casi 59 segundos mucho menor que los 176 de la situación actual.

## 5.2. CONCLUSIONES DE LA INTERSECCIÓN N°1.

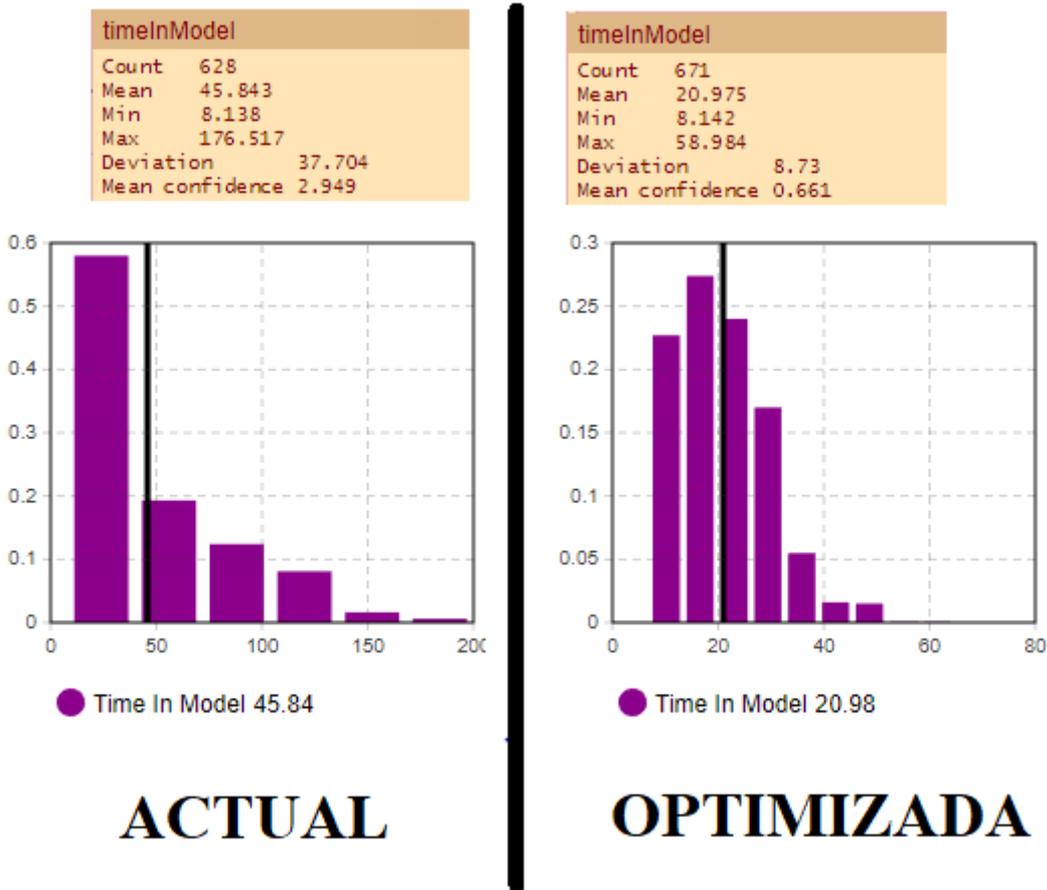


Ilustración 63. Gráfico comparativo entre la situación actual y la optimizada en la intersección n°1. Fuente: Elaboración propia

Como ya se mencionó anteriormente esta intersección tiene el problema de que la duración de la fase verde de los accesos este y oeste es muy reducida para el volumen de tráfico que puede llegar a ella, por tanto, puede verse como en la simulación de la situación actual el valor máximo de tiempo en el sistema asciende a 176 segundos en la intersección para algunos vehículos, una situación muy desesperante para los conductores que la sufren.

Si comparamos ambas situaciones, se ha conseguido reducir el tiempo en el sistema en 25 segundos por vehículo de media, como puede verse en la ilustración 63, y si le restamos el tiempo mínimo en el sistema para obtener el retraso medio se pasa de 37 segundos por vehículo a 12 segundos por vehículo, es decir, también una **reducción de 25 segundos** o lo que es lo mismo, una **reducción del 67,56 % de la demora.**

### 5.3. INTERSECCIÓN N°2

Continuaremos por el modelo de la intersección n°2 en AnyLogic, ver ilustración 64, donde como en el modelo de la intersección n°1 se encuentran representados los posibles giros en la intersección, la zona del paso de peatones y la zona por donde transitan los peatones.



*Ilustración 64. Representación gráfica del modelo de la intersección n°2 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.*

En esta ocasión no hay paradas de autobús en la zona de influencia de la intersección, pero si transitan por ella varios autobuses, como se puede ver en el diagrama de flujo que describe el comportamiento del modelo en la ilustración 65.

La característica nueva de este diagrama de flujo se encuentra en el carMoveToN, donde es necesario añadir la conexión que sale con la flechita roja, que quiere decir en este caso que si un vehículo que circula por el acceso este quiere girar hacia el acceso norte y se encuentra en el carril izquierdo, este no podría realizar el giro deseado y por consiguiente el modelo daría un error, esta nueva conexión permite que si no puede realizar el giro por estar en un carril inadecuado, se mueva al carril donde si pueda realizar el giro.

Análisis y mejora de intersecciones semaforizadas en Murcia mediante el control semafórico actuado por vehículos.

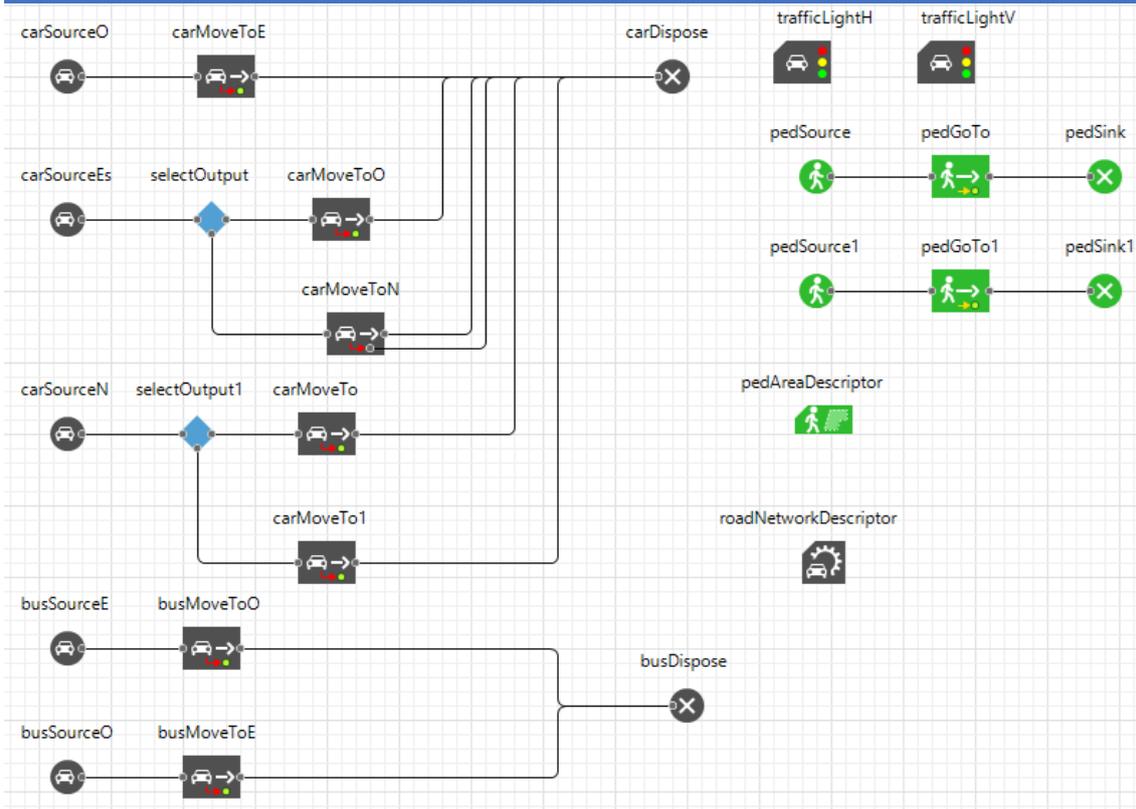


Ilustración 65. Diagrama de flujo del modelo de la intersección n°2 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.

También puede verse el mapa de densidad como en la intersección anterior en la ilustración 66.

En este caso se ha utilizado la planilla de duración del ciclo de la intersección número 2 que volvemos a mostrar en la tabla 114.

Tabla 114. Fases de señalización de la intersección n°2. Fuente: Elaboración propia

	Planilla duración del ciclo (s)		
	Verde	Ámbar	Rojo
Fase 1	108	3	29
Fase 2	20	3	117

Una vez que tenemos el modelo diseñado pasamos a la verificación del mismo, comparando los resultados de la simulación con los calculados mediante el método del HCM.

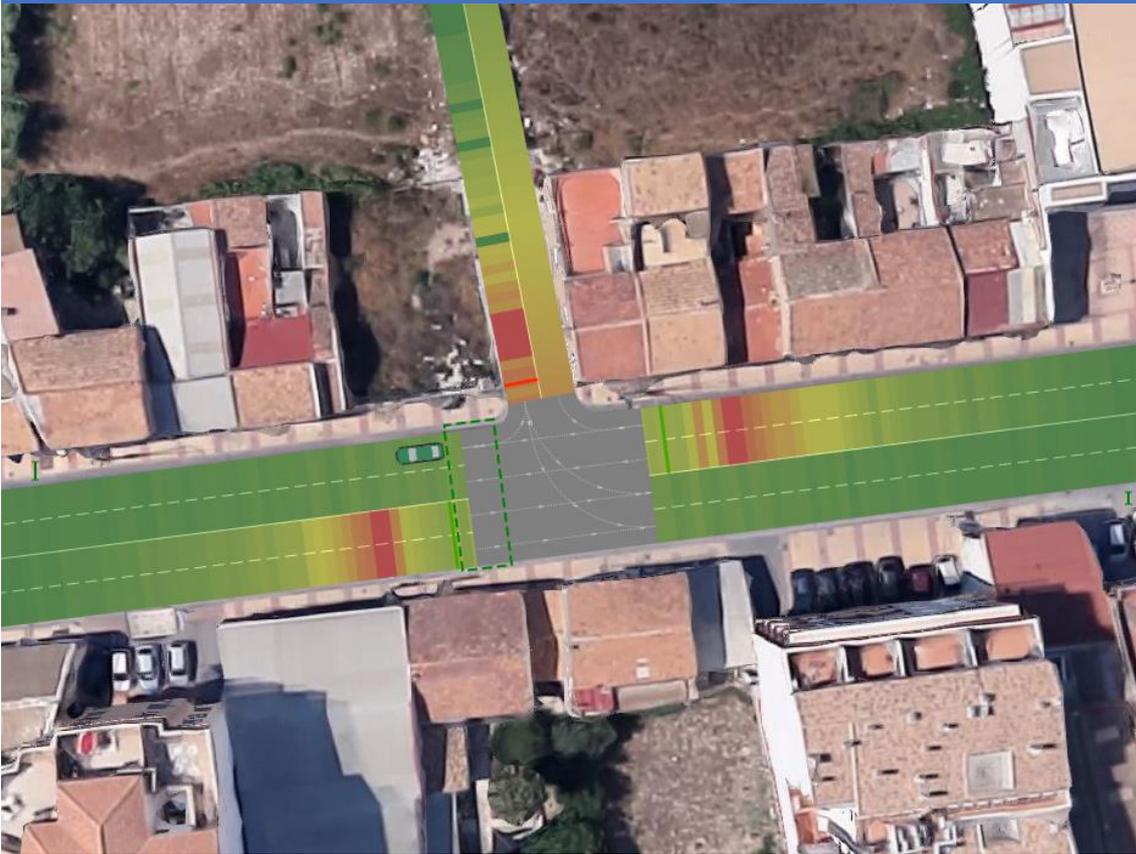
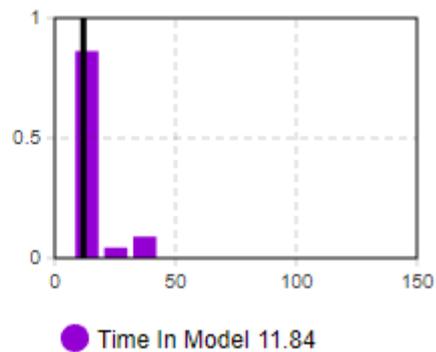


Ilustración 66. Mapa de densidad de la intersección nº2 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.

Tras la simulación los resultados que obtenemos del programa son los siguientes:

Tabla 115. Tiempo en el sistema de la intersección nº2.

timeInModel	
Count	984
Mean	11.841
Min	7.388
Max	112.727
Deviation	10.549
Mean confidence	0.659



Como puede verse en la tabla 115, durante la simulación han circulado 984 vehículos por la intersección, cuya media de tiempo en el sistema es de casi 12 segundos y, si continuamos con la suposición de que si restamos el tiempo medio en el sistema y el tiempo mínimo en el sistema, obtendremos el retraso medio en la intersección, que en este caso sería de unos 4,45 segundos, circunstancia que dista bastante de la obtenida

mediante el procedimiento del HCM donde el retraso medio de la intersección era de 10,62 segundos.

Tras el estudio de esta intersección se ha llegado a la conclusión de que esta diferencia es debida a que está afectada por otra intersección anterior, el llamado offset time, el cual hace que cuando se pone en verde el semáforo de la intersección anterior a la de estudio cuando los vehículos llegan a nuestra intersección también se encuentra en fase roja, lo que hace que se acumulen los vehículos en el acceso oeste.

Para incluir este factor al modelo, se ha añadido otra intersección ficticia en el acceso oeste que reproduzca el efecto de esta sobre la intersección objeto de estudio, cuyo aspecto sería el de la ilustración 67.



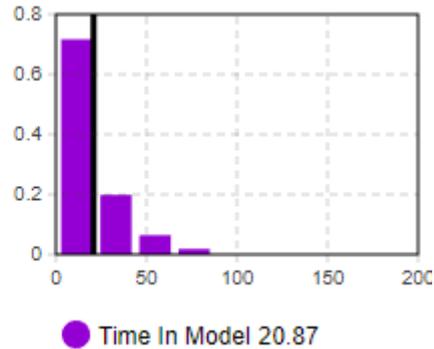
*Ilustración 67. Representación gráfica del modelo de la intersección n°2 con intersección adicional en AnyLogic.  
Fuente: Elaboración propia.*

Una vez se tiene el nuevo modelo, se procede a la simulación para verificar si los resultados que arroja se asemejan con los de la realidad.

Tras una nueva simulación se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 116. Tiempo en el sistema de la intersección n°2 con intersección adicional.

timeInModel	
Count	935
Mean	20.87
Min	10.2
Max	152.939
Deviation	15.395
Mean confidence	0.987



En esta nueva simulación han circulado 935 vehículos sobre el sistema, y si hacemos las mismas suposiciones mencionadas anteriormente, con un retraso medio de 10,67 segundos, un resultado prácticamente similar al obtenido mediante el procedimiento del HCM.

Una vez tenemos el modelo verificado, procedemos a optimizar el modelo sólo para los semáforos de la intersección objeto de estudio.

Para ello se le asigna un parámetro p1 a la duración de la fase verde de los semáforos este y oeste de la intersección, además de la fase roja de semáforo del acceso norte, y el parámetro p2 a la fase roja de los semáforos este y oeste junto a la fase verde del semáforo del acceso norte de la intersección objeto de estudio.

Se procede a realizar un experimento de optimización en AnyLogic con los siguientes resultados:

	Current	Best
Iterations completed:	66	18
Objective: ↓	17.863	16.814
Parameters		Copy best
p1	78	79
p2	10	6

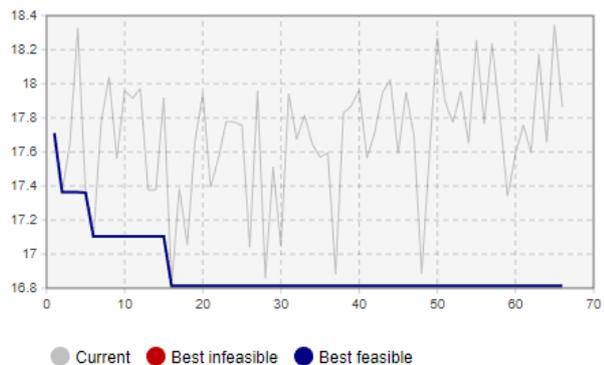


Ilustración 68. Experimento de optimización de la intersección n°2 con intersección adicional.

De modo que los ciclos verde y rojo de la intersección pasarían a los de la tabla 117.

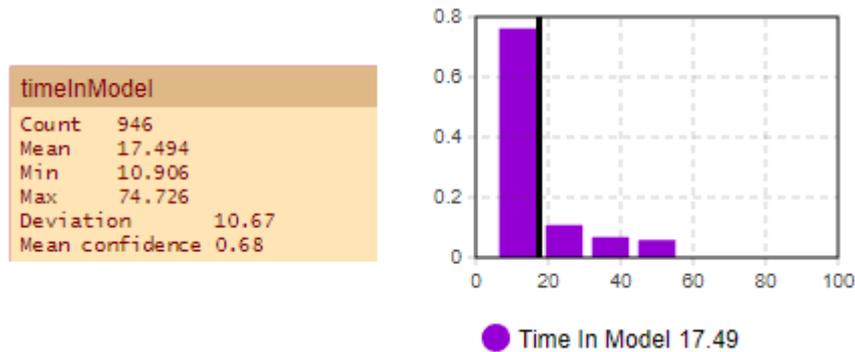
Tabla 117. Fases de señalización optimizados de la intersección nº2 con intersección adicional. Fuente: Elaboración propia

	Planilla duración del ciclo optimizada (s)		
	Verde	Ámbar	Rojo
Fase 1	79	3	6
Fase 2	6	3	79

Si analizamos la tabla 117 puede observarse que la duración del ciclo total se ha reducido para que los vehículos que esperan en el ramal más desfavorable no permanezcan mucho tiempo esperando en la intersección aun habiendo reducido su tiempo de fase verde, pero como la intensidad que circula por el acceso norte es muy escasa el tiempo es más que suficiente para que no retrase a los vehículos que circulan en el flujo de este a oeste y viceversa.

Tras la simulación estos son los resultados obtenidos:

Tabla 118. Tiempo en el sistema optimizado de la intersección nº2 con intersección adicional.



Como era de esperar los resultados ratifican las suposiciones que se hicieron al cambiar la duración de las fases, pasando de un tiempo en el sistema máximo de casi 153 segundos a 74 segundos, es decir, se ha conseguido reducir un 52%.

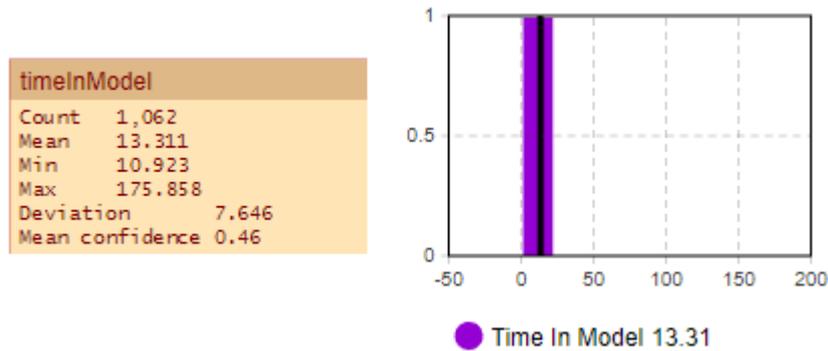
En cuanto al retraso medio, tomando en cuenta las consideraciones ya vistas, en el modelo sin optimizar era de 10,67 segundos, y con la intersección optimizada de 6,58 segundos, por lo tanto, se ha reducido la demora media en un 38,33% (4,09 segundos), un valor que no está nada mal.

Pero no pretendemos dejarlo de esta manera, vamos a comprobar cómo quedaría si estuvieran optimizadas las 2 intersecciones.

Realizamos el mismo proceso que acabamos de utilizar para optimizar la intersección, pero en este caso teniendo en cuenta las 2 intersecciones.

Una vez tenemos optimizado el modelo, realizamos la simulación y estos son los resultados:

Tabla 119. Tiempo en el sistema optimizado de la intersección n°2 con intersección adicional optimizada.



Como puede observarse en la tabla 119, han circulado 1.062 vehículos durante la simulación, con un tiempo medio en el sistema de 13,31 segundos, uno mínimo de 10,92 y un máximo de 175,85 segundos, con estos datos podemos decir que el retraso medio en la intersección es de 2,39 segundos, es decir si lo comparamos con la situación base se ha reducido la demora en un 77,6 %. Si bien hay que decir que el tiempo máximo en el sistema ha aumentado en algunos segundos, pero esto puede ser debido a que algún vehículo se ha encontrado en la situación más desfavorable de la señalización, lo que no influye en demasía sobre la media.

## 5.4. CONCLUSIONES DE LA INTERSECCIÓN N°2.

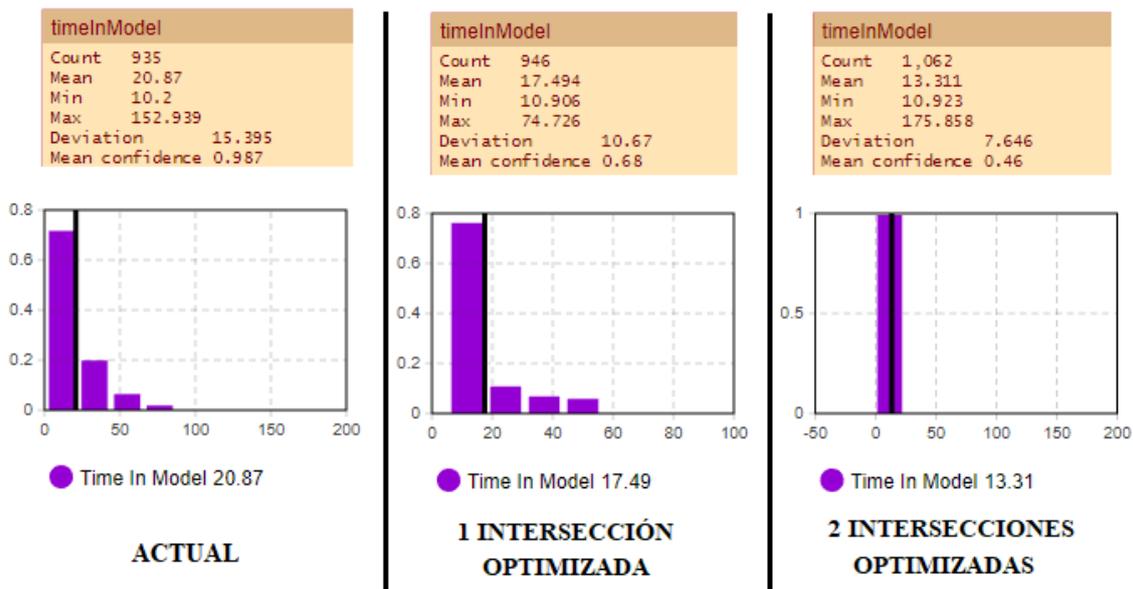


Ilustración 69. Gráfico comparativo de las distintas situaciones de la intersección n°2. Fuente: Elaboración propia

El problema de esta intersección es que existe un flujo muy elevado de vehículos por los accesos este y oeste, teniendo uno muy reducido el del acceso norte, lo que hace que aunque el semáforo esté en fase roja para los vehículos de los accesos este y oeste poco tiempo, afecta sobre el retraso medio de la intersección, por lo tanto debe ser lo más favorable posible en cuanto a la señalización en esas direcciones, y eso es lo que haría un semáforo actuado por los vehículos realizando una regulación como la vista en este apartado.

Si comparamos la situación actual con la situación en la que se ha optimizado la intersección objeto de estudio, se ha conseguido reducir un 38,33% el retraso medio, lo que se traduce en una reducción de 4,09 segundos, pasando de los 10,67 a 6,58 segundos de demora media. Como esta intersección está afectada por la anterior es normal que si sólo optimizamos una no se llegue a una mejora muy elevada.

Sin embargo, al comparar la situación actual con la situación en la que las 2 intersecciones están optimizadas, se pasa de un retraso medio de 10,67 segundos a 2,39 segundos, es decir una **reducción del 77,6 % de la demora**, un valor de reducción de la demora muy elevado que la acerca casi al valor nulo de retraso medio.

### **5.5. INTERSECCIÓN N°3**

Finalmente realizaremos el modelo de la intersección n°3 en AnyLogic, tras un estudio del comportamiento de los anteriores modelos se ha decidido no modelizar los peatones, ya que aunque en esta intersección es donde mayor efecto podrían tener el programa no tiene una buena interacción entre los vehículos y los automóviles, siendo la única posibilidad programar para que pasen cuando un semáforo seleccionado se encuentre en una fase determinada, pero en este caso, como hay giros permitidos donde los vehículos deberían de ceder el paso a los peatones no se puede utilizar este comando, ya que al realizar estos giros permitidos en el modelo los vehículos pasarían sobre los peatones. Este hecho puede verse en el diagrama de flujo en la ilustración 71.



*Ilustración 70. Representación gráfica del modelo de la intersección n°3 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.*

Otra de las dificultades que ha tenido la realización de este modelo es que en el programa no permite diseñar carriles adicionales, es decir, que si al principio del tramo tiene dos carriles en una dirección no puede tener 3 después, como ocurre en el acceso noreste.

Este hecho se ha solucionado mediante la creación de intersecciones, de modo que se pueden unir tramos de distinto número de carriles para que sigan teniendo una

continuidad. Además, tampoco se han modelizado las zonas de aparcamientos, y esto es debido a que es una zona de estacionamiento de larga duración y si los vehículos se mantienen mucho tiempo estacionados distorsionarían nuestro parámetro para optimizar la intersección, que es el tiempo en el sistema de los vehículos.

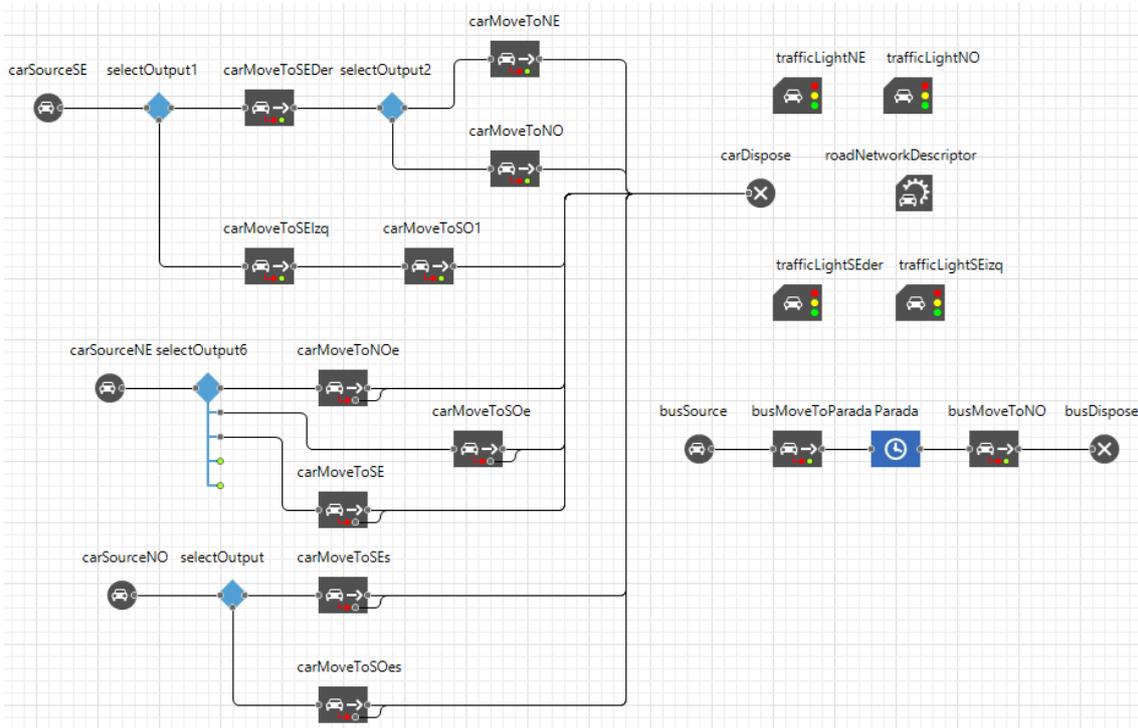


Ilustración 71. Diagrama de flujo del modelo de la intersección nº3 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.

Como en las anteriores intersecciones puede verse el mapa de densidad en función de la velocidad de los vehículos en la ilustración 72.

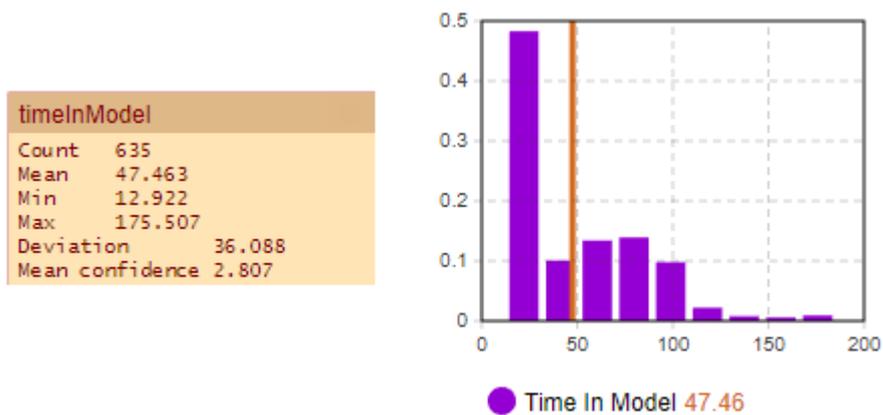
Aunque puede apreciarse que en las zonas donde se han creado las intersecciones para simular ese aumento del número de carriles no aparece el sombreado ya que el programa las toma como zonas donde se realizan los giros de los vehículos. Además, también se puede ver que la zona más afectada es el acceso noreste.



Ilustración 72. Mapa de densidad de la intersección nº3 en AnyLogic. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se tiene el modelo el siguiente paso es verificar que sus resultados se ajustan con los de la realidad, comparándolos con los obtenidos mediante la metodología del HCM con datos tomados en campo. Los resultados de la simulación son los siguientes:

Tabla 120. Tiempo en el sistema de la intersección nº3.



Como se puede ver en la tabla 120, durante la hora de simulación han circulado 635 vehículos por la intersección, con una media de tiempo en el sistema de 47,46 segundos, un mínimo de 12,92 segundos y un máximo de 175,5 segundos.

Aplicando la suposición de que el retraso medio es la resta del tiempo medio y el mínimo tenemos un valor de 34,54 segundos, que está muy cercano de los 34,98 obtenidos mediante el procedimiento del HCM, por lo tanto, se da por validado el modelo.

A continuación, para optimizar los tiempos de los ciclos de los semáforos se ha estudiado la secuencia de las fases de los semáforos en función de 4 parámetros, cuyo resultado es el siguiente:

Tabla 121. Secuencia de fases en la intersección nº3. Fuente: Elaboración propia.

Secuencia de fases en la intersección nº3			
Acceso noreste	p1	p2	p3
Acceso noroeste	p1+p2	p4	p2
Acceso sureste carril izq.	p1+2·p2+p4		p3-p4-2·p2
Acceso sureste carril der.	p1+p2	p3-p2	

Una vez se tiene la duración de las fases de los semáforos en función de parámetros, se hace un experimento de optimización en AnyLogic, como puede verse en la ilustración 73.

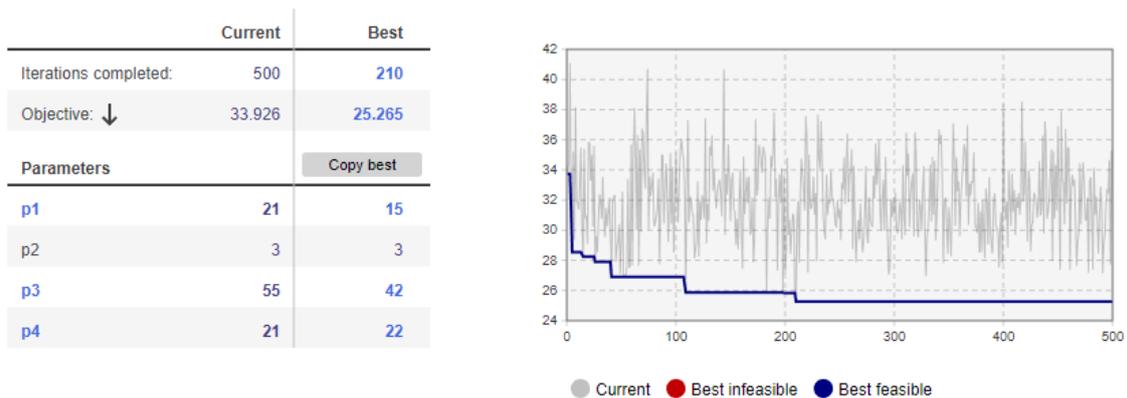


Ilustración 73. Experimento de optimización de la intersección nº3.

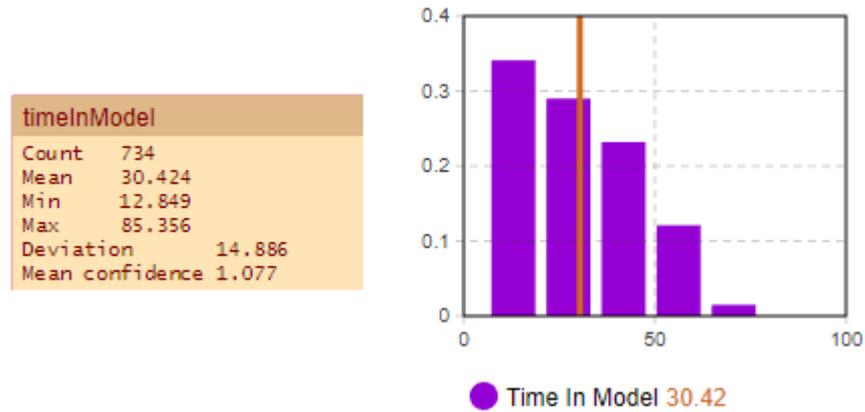
Conocidos los valores de los parámetros, la nueva secuencia de fases es la de la tabla 122.

Tabla 122. Nueva secuencia de fases en la intersección nº3. Fuente: Elaboración propia.

Secuencia de fases en la intersección nº3			
Acceso noreste	15	3	42
Acceso noroeste	18	22	3
Acceso sureste carril izq.	43		14
Acceso sureste carril der.	18	39	

Tras una 1 hora de simulación con estos valores, los resultados arrojados por el programa son los siguientes:

Tabla 123. Tiempo en el sistema de la intersección n°3 optimizada.



En esta simulación han circulado 734 vehículos por la intersección, con un tiempo medio en el sistema de 30,42 segundos, un mínimo de 12,84 segundos y un máximo de 85,35 segundos.

Como en el anterior modelo obtenemos el valor del retraso medio por la diferencia entre el valor medio y el mínimo en el sistema, que en este caso es de 17,56 segundos de media.

Si comparamos los resultados se ha conseguido reducir los 34,54 segundos de retraso medio de la situación original a 17,56 segundos, es decir un **49,1 % de reducción** de la demora.

Tras un análisis de la situación de la intersección se ha pensado que la distribución de fases que tiene actualmente la intersección no es la más adecuada, ya que se piensa que por el acceso noroeste no circula tanta intensidad de tráfico como para tener una fase verde exclusiva en el acceso sureste, por ello se plantea la siguiente distribución de las fases de los semáforos.

Tabla 124. Cambio en la secuencia de fases en la intersección n°3. Fuente: Elaboración propia.

Secuencia de fases en la intersección n°3 con cambio de fases			
Acceso noreste	p1	p2	p3
Acceso noroeste	p1+p2		p3-p2
Acceso sureste carril izq.	p1+p2		p3-p2
Acceso sureste carril der.	p1+p2		p3-p2

Esta nueva secuencia de fases más sencilla puede permitir duraciones de ciclos totales más reducidos y por lo tanto una mayor fluidez y una menor retención.

Para comprobar este hecho se ha realizado otro experimento de optimización en AnyLogic con los parámetros mostrados en la tabla 124.

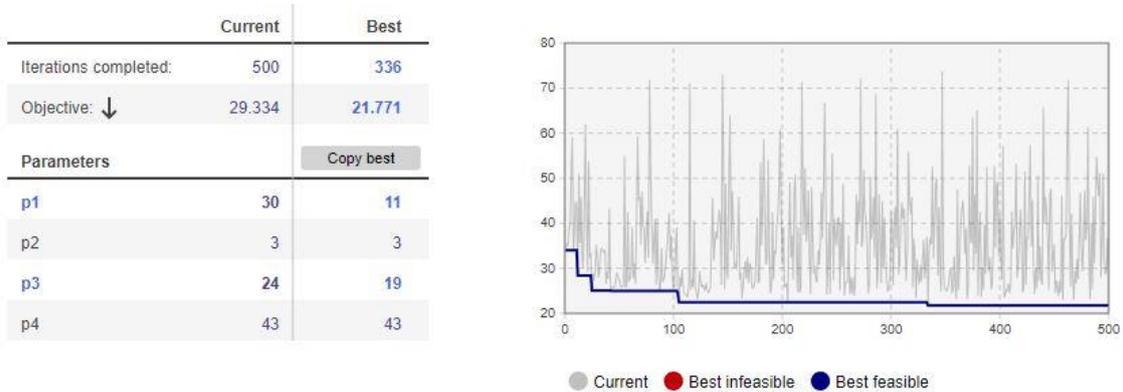


Ilustración 74. Experimento de optimización de la intersección n°3 con nueva secuencia de fases.

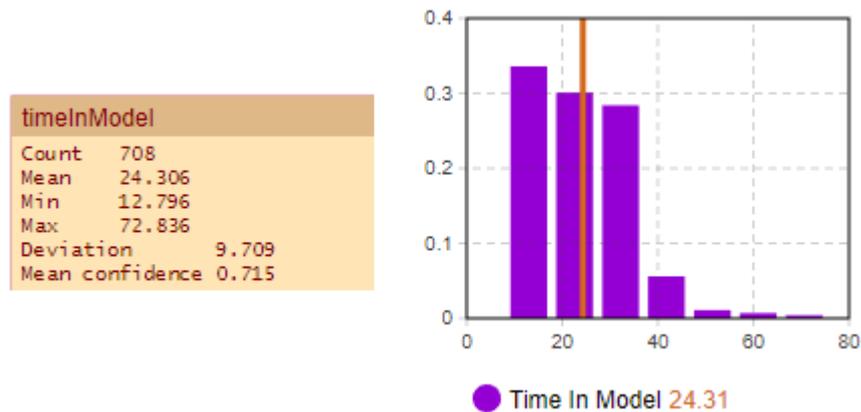
Con estos valores para los parámetros se ha elaborado la nueva secuencia de fases que puede verse en la tabla 125.

Tabla 125. Valores del cambio en la secuencia de fases en la intersección n°3. Fuente: Elaboración propia.

Secuencia de fases en la intersección n°3 con cambio de fases			
Acceso noreste	11	3	19
Acceso noroeste	14	16	3
Acceso sureste carril izq.	14	16	3
Acceso sureste carril der.	14	16	3

Con estos valores se realiza una simulación en AnyLogic, cuyos resultados son los siguientes:

Tabla 126. Tiempo en el sistema con la nueva secuencia de fases de la intersección n°3 optimizada.



En esta simulación de 1 hora han circulado por la intersección 708 vehículos, con una media de tiempo en el sistema de 24,3 segundos, una mínima de 12,79 segundos y una máxima de 72,83 segundos.

Utilizando las mismas suposiciones que en casos anteriores, el retraso medio con esta disposición es de 11,51 segundos, y si lo comparamos con la situación actual, reduce el retraso medio de 34,54 segundos a 11,51 segundos, por lo que se consigue una **reducción del 66,67 %** de la demora, mejorando los resultados de optimizar la intersección con la secuencia de fases original, que conseguía una reducción del 49,1 %.

Una vez que se ha conseguido mejorar y reducir los retrasos que se producen en la intersección, ahora se propone plantear una situación de futuro en la cual la densidad de tráfico aumenta para ver como evoluciona los tiempos de las fases de los semáforos.

Para comenzar se plantea un aumento en la intensidad en los accesos sureste pasando de tener 295 vehículos por hora a 400, y del acceso noroeste, aumentando desde 160 vehículos por hora a 250, una situación que puede ser posible en un futuro.

Para ello se va a hacer un experimento de optimización en el modelo de la intersección con dos fases, es decir el último utilizado, cuyo resultado es el siguiente:

Análisis y mejora de intersecciones semaforizadas en Murcia mediante el control semafórico actuado por vehículos.

	Current	Best
Iterations completed:	500	83
Objective: ↓	47.282	22.39
Parameters		Copy best
p1	19	10
p2	3	3
p3	30	30
p4	43	43

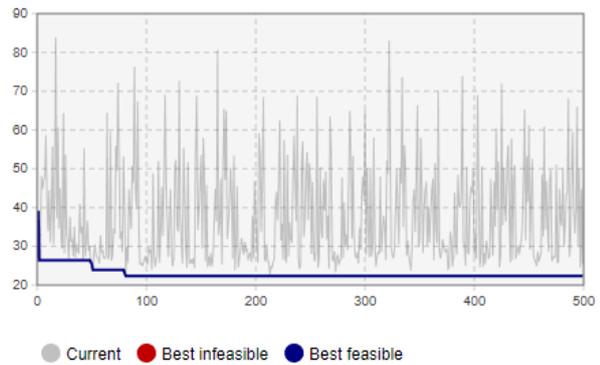


Ilustración 75. Experimento de optimización de la intersección nº3 con aumento de intensidad de tráfico.

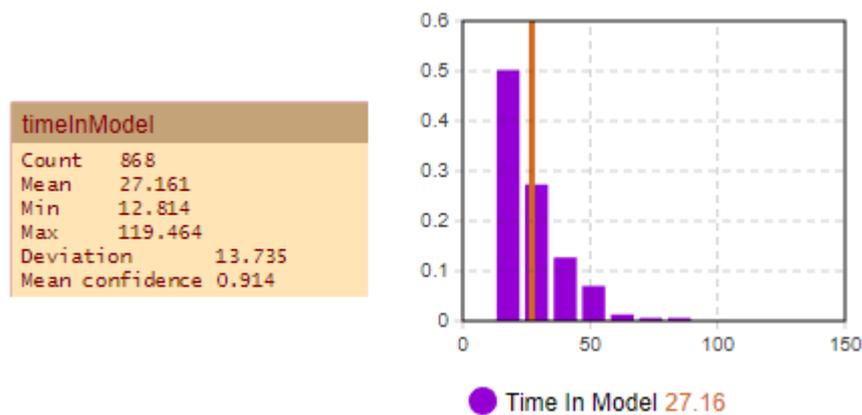
De modo que la secuencia y duración de las fases son las de la tabla 127.

Tabla 127. Secuencia de fases en la intersección nº3 con aumento de intensidad de tráfico. Fuente: Elaboración propia.

Secuencia de fases en la intersección nº3 con aumento de intensidad de tráfico			
Acceso noreste	10	3	30
Acceso noroeste	13		27
Acceso sureste carril izq.	13		27
Acceso sureste carril der.	13		27

Con esta secuencia de fases se realiza una simulación en AnyLogic, y los resultados son los siguientes:

Tabla 128. Tiempo en el sistema de la intersección nº3 con aumento de tráfico optimizada.



Como puede verse en esta simulación el retraso medio obtenido es de 14,35 segundos, si se compara el retraso medio con la intensidad de tráfico actual con esta, en la cual esta aumentada, solamente sufre un incremento de 2,84 segundos, lo que quiere decir que la

intersección funciona de una manera adecuada y mantiene el nivel de servicio aun con el incremento en la intensidad de tráfico.

Para intentar llevar al extremo esta situación, se plantea ahora incrementar la intensidad de tráfico del acceso sureste de 295 vehículos por hora a 600, el acceso noroeste de 160 vehículos por hora a 400 y el acceso noreste de 323 vehículos por hora a 600.

Esta sería una posibilidad poco probable de futuro a corto plazo, pero de todos modos se va a probar para ver lo que ocurriría.

De nuevo se realiza el experimento de optimización en AnyLogic para saber el valor de los parámetros como puede verse en la ilustración 76.

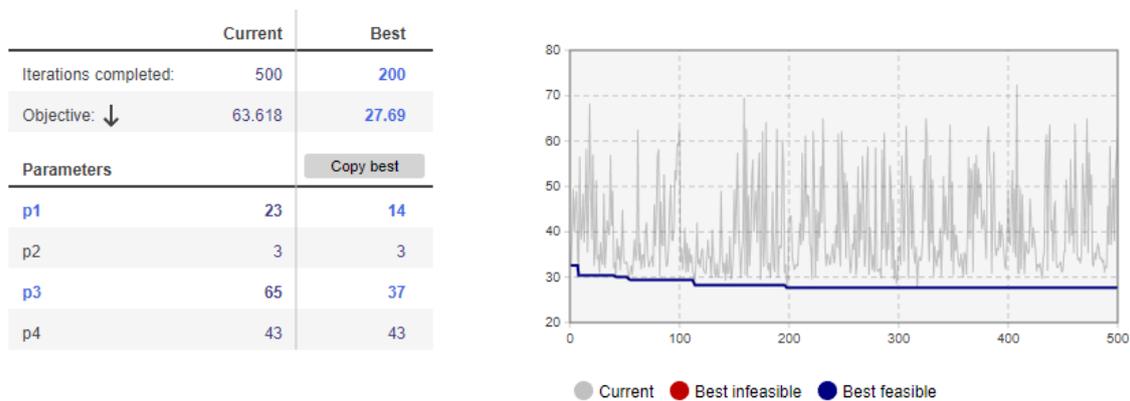


Ilustración 76. Experimento de optimización de la intersección nº3 con aumento de intensidad de tráfico (2).

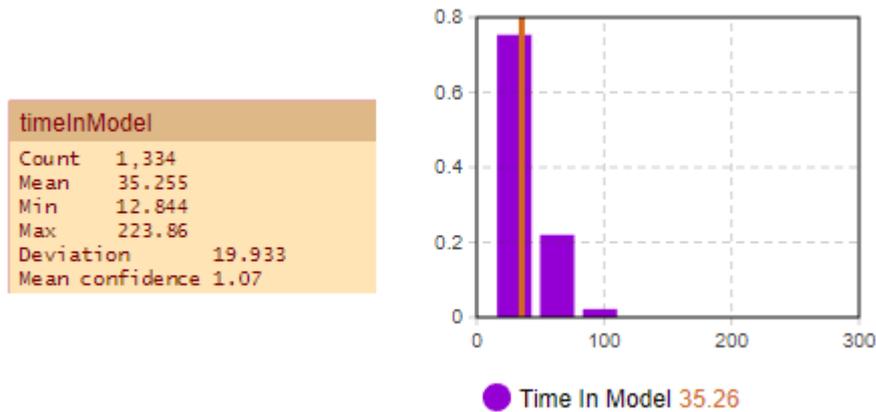
Por lo que la secuencia de fases quedaría de la siguiente manera:

Tabla 129. Secuencia de fases en la intersección nº3 con aumento de intensidad de tráfico (2). Fuente: Elaboración propia.

Secuencia de fases en la intersección nº3 con aumento de intensidad de tráfico (2)			
Acceso noreste	14	3	37
Acceso noroeste	17		34
Acceso sureste carril izq.	17		34
Acceso sureste carril der.	17		34

Con esta secuencia de fases y duraciones, los resultados obtenidos mediante la simulación en AnyLogic son los de la tabla 130.

Tabla 130. Tiempo en el sistema de la intersección n°3 con aumento de tráfico (2) optimizada.



Como puede apreciarse el retraso medio va aumentando hasta los 22,41 segundos, pero además, se observa que el tiempo máximo ha aumentado mucho, hasta los 223 segundos, lo que quiere decir que ya se han producido atascos en la intersección.

Finalmente se va a probar a utilizar la distribución de fases original en la intersección, para comprobar si mejora los resultados de la prueba anterior.

De modo que se realiza un nuevo experimento de optimización en AnyLogic, cuyos resultados se muestran en la ilustración 77.

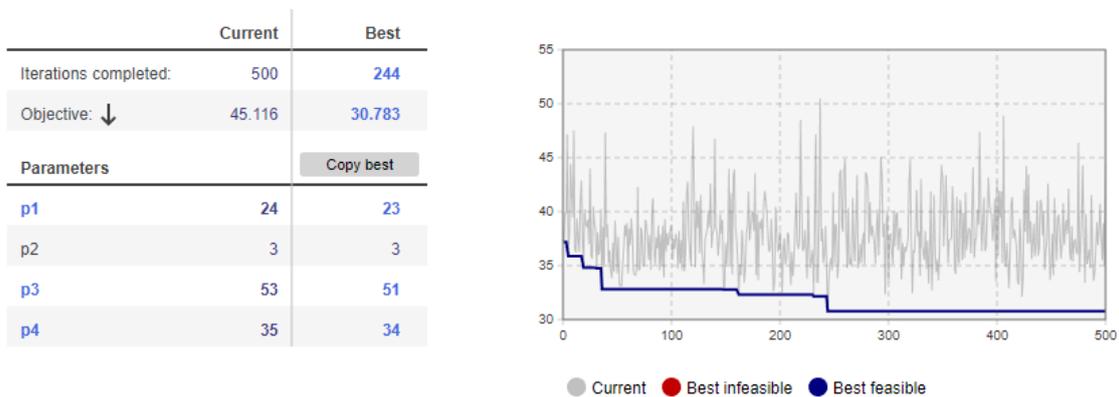


Ilustración 77. Experimento de optimización de la intersección n°3 con aumento de intensidad de tráfico (3).

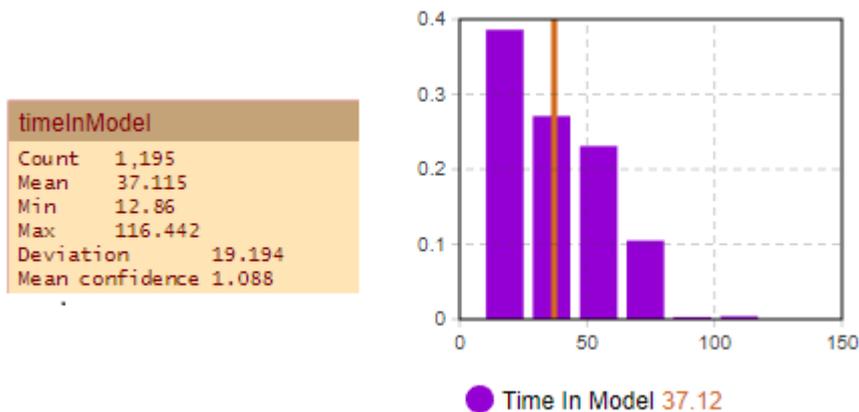
Con lo cual la secuencia de fases y sus duraciones quedarían de la siguiente manera:

Tabla 131. Secuencia de fases en la intersección nº3 con aumento de intensidad de tráfico (3). Fuente: Elaboración propia.

Secuencia de fases en la intersección nº3 con aumento de intensidad de tráfico (3)				
Acceso noreste	23	3	51	
Acceso noroeste	26		34	3
Acceso sureste carril izq.	63			11
Acceso sureste carril der.	26	48		3

Tras una simulación de 1 hora en AnyLogic los resultados son los mostrados en la tabla 132.

Tabla 132. Tiempo en el sistema de la intersección nº3 con aumento de tráfico (3) optimizada.



En esta simulación puede observarse que el retraso medio ha aumentado hasta los 24,25 segundos en comparación con la otra secuencia de fases, cuyo retraso medio era de 22,41 segundos, sin embargo, el tiempo máximo en el sistema ha disminuido hasta casi la mitad, desde los 223,86 segundos en el anterior modelo a los 116,44 segundos de este, por lo que se puede decir que aunque de media tenga algo más de retraso, en este modelo no se producen los atascos que se producían en el anterior.

### 5.6. CONCLUSIONES DE LA INTERSECCIÓN N°3.

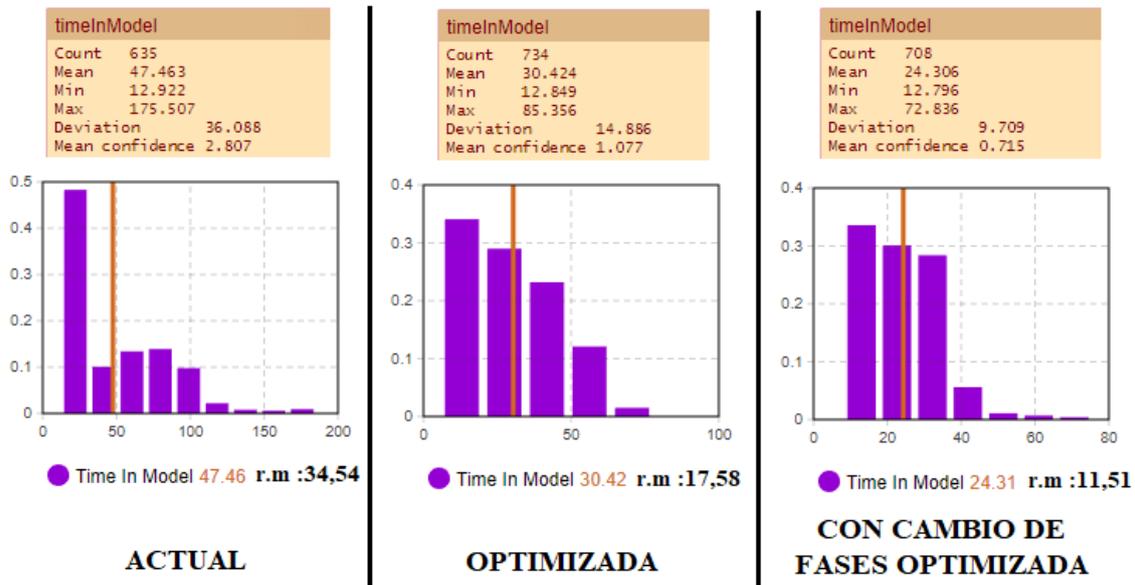


Ilustración 78. Gráfico comparativo de las distintas situaciones de la intersección n°3. Fuente: Elaboración propia

En el estudio de esta intersección, se ha llegado a la conclusión de que el principal problema es la secuencia de fases, es decir, la actual funcionaría bien si hay una elevada intensidad de tráfico, pero para la que soporta actualmente lo único que hace es que la intersección tenga una mayor demora.

Como se puede ver en la ilustración 78, la situación inicial tiene un retraso medio de 34,54 segundos, y solamente con optimizar los tiempos de las fases se consigue reducirla un 49,1 % hasta los 17,58 segundos, pero si además se realiza un cambio en la secuencia de fases y se optimiza la duración de estas, se llega a reducir un 66,67 % con respecto de la situación actual, llegando a conseguir que la intersección tenga un retraso medio de 11,51 segundos.

Una vez se ha optimizado la situación actual se plantea una serie de posibles situaciones futuras, donde en la primera se incrementa la intensidad de tráfico que accede desde los ramales sureste y noroeste, en la segundo se amplifica esta subida de intensidad de tráfico y además también se aumenta en el acceso noreste, y finalmente se utiliza esta misma situación pero con la distribución de fases inicial para saber si funciona mejor con altas intensidades de tráfico tal y como se suponía.

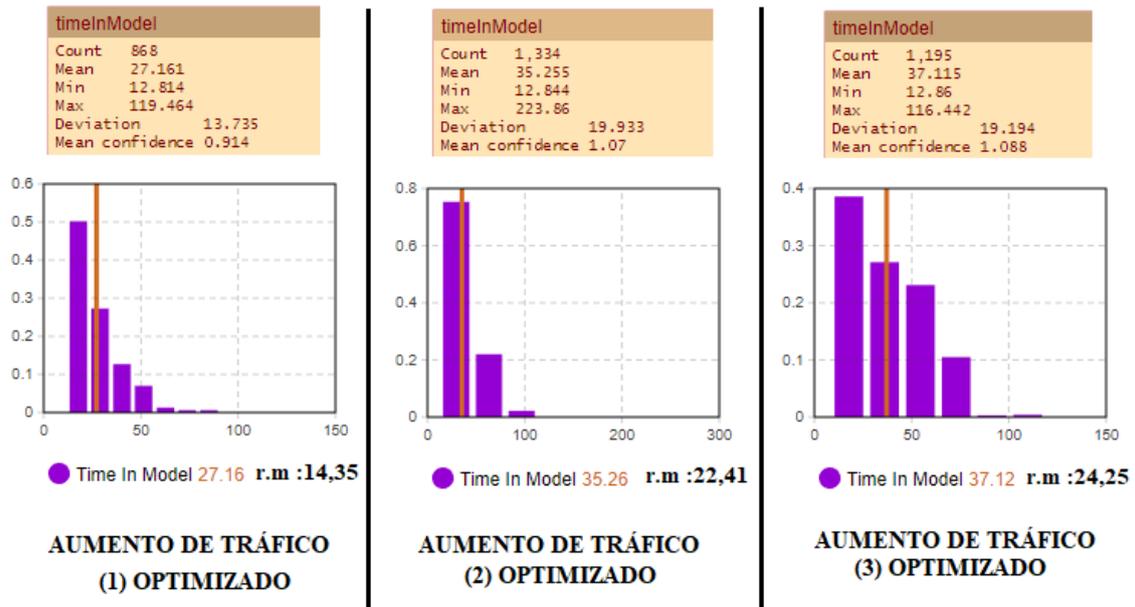


Ilustración 79. Gráfico comparativo de las distintas situaciones con aumento de la intensidad de tráfico de la intersección nº3. Fuente: Elaboración propia

En la primera prueba, tal y como se puede ver en la ilustración 79 el retraso medio de la intersección aumenta desde los 11,51 segundos hasta los 14,35, siendo esto una situación lógica debido al aumento de tráfico en la intersección.

En la segunda prueba ya con una intensidad de tráfico muy elevada, aunque el retraso medio sólo ascienda a los 22,44 segundos, se produce una duración máxima en el sistema de 223,86 segundos, lo que indica que se han producido atascos y por consiguiente este sistema de señalización deja de ser eficiente.

Sin embargo, en la prueba 3 se utiliza la misma secuencia de fases que en la intersección original, y aunque el retraso medio en la intersección aumenta un poco hasta los 24,25 segundos el tiempo máximo en el sistema cae desde los 223,86 segundos hasta los 116,44 segundos, lo que quiere decir que en esta situación no se producen atascos y por consiguiente esta configuración funciona mejor para altas intensidades de tráfico tal y como se suponía.

# **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y** **LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS**

## **6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS**

Una vez desarrollado todo el trabajo mostrado en los capítulos anteriores se han alcanzado las siguientes conclusiones relacionadas con los objetivos que se plantearon al comienzo de este TFM.

En primer lugar, se ha cumplido el objetivo de estudiar la situación actual de las 3 intersecciones objeto de estudio mediante la aplicación del método de cálculo propuesto por el Manual de Capacidad Americano, gracias a este método posteriormente se han podido verificar los modelos que se han realizado en AnyLogic, y además han permitido reducir los retrasos medios que se producían en las 3 intersecciones seleccionadas de la ciudad de Murcia.

Por otro lado, se han podido realizar y optimizar los modelos de las intersecciones objeto de estudio, llegando a reducir un 67,56 % de la demora en la primera intersección estudiada, un 77,6 % en la segunda y un 66,67 % en la última. Esto ha sido gracias a la posibilidad de simular distintos escenarios con el programa AnyLogic, lo que permite reducir y prevenir cierto tipo de accidentes en las intersecciones, reducir la demora de los vehículos, reducir el consumo de combustible y reducir la emisión de contaminantes a la atmósfera.

Una vez se han conseguido alcanzar los objetivos, se han planteado posibles situaciones futuras que se podrían dar en la última de las intersecciones, aumentando la intensidad de tráfico que circularía por ella y viendo como evolucionaría el retraso medio de la intersección y cual sería la mejor configuración de secuencia de fases en los semáforos. No obstante, hay que resaltar que el programa de simulación utilizado no tiene una buena interrelación entre vehículos y peatones, por eso los modelos no estaban influenciados por estos últimos.

Partiendo de las conclusiones obtenidas se plantean las siguientes 3 líneas futuras de trabajo.

Este TFM se ha realizado sobre intersecciones individualizadas, aunque en una de ella se haya tenido en consideración una adicional, no se tiene en cuenta todas las demás que se encuentran en sus cercanías, por eso una línea de investigación sería el estudio y mejora de intersecciones a nivel macro.

Otra línea de investigación podría ser la utilización de otro programa de simulación que tenga una mejor interrelación de los vehículos con los peatones, de modo que se puedan realizar modelos que estén afectados por los peatones y se ajusten más a la realidad.

Por último, pero no por ello menos importante, es el punto de vista del peatón, la mayoría de veces sólo se tiene en cuenta la demora que sufren los vehículos, pero hoy en día, y sobre todo en las ciudades, es muy importante el papel de los peatones en ella y en su movilidad, por ello una posible línea futura de investigación sea la de plantear el problema de la demora, pero en vez de los vehículos de los peatones, ya que está en juego uno de los recursos que son imposibles de recuperar en la vida, el tiempo.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## **BIBLIOGRAFÍA**

- TBR, Transportation Research Board (2000). Highway Capacity Manual 2000. S.
- Ghulam H. Bham and Rahim F. Benekohal. A high fidelity traffic simulation model based on cellular automata and car-following concepts. Transportation Research Part C, 12:1–32, 2004.
- B. De Schutter. Optimizing acyclic traffic signal switching sequences through an extended linear complementarity problem formulation. European Journal of Operational Research, 139(2):400–415, 2002.
- B. De Schutter and B. De Moor. Optimal traffic light control for a single intersection. European Journal of Control, 4(3):260–273, 1998.
- J.M. Navarro Alarcón. Estudio del Manual de Capacidad Americano (Highway Capacity Manual) y aplicación a intersecciones en la ciudad de Murcia. Propuestas de mejora de los niveles de servicio observados. Trabajo de Fin de Máster. Universidad Politécnica de Cartagena, 2016.
- Rodríguez D. (2015). Revisión del HCM 2010 y 2000 Intersecciones Semaforizadas. *Ingenium*, vol 16. N° 32, pp 19-31.
- Kraemer, Carlos; Pardillo, Jose Maria; Rocci, Sandro; Romana, Manuel G; Sanchez
- Blanco, Victor; del Val, Miguel Ángel. (2004). *Ingeniería de carreteras. Volumen I*. (1ª ed.). Madrid: Mc Graw Hill.
- <https://www.anylogic.com>.
- C.S. Lema Fernández. Modelos y algoritmos solución para un problema de control óptimo de semáforos. Aplicación a cruces con 2, 3, 4 o 6 fases en la ciudad de La Coruña. Tesis doctoral. Universidad de la Coruña, 2012.
- Allende, A. Blanco, C.S. Lema, and L.P. Pedreira. Modelo de optimización con restricciones de equilibrio para el control de semáforos. *Rect@*, Actas 14, 1:44.1–44.13, 2006.