



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería en Organización Industrial**

**MODELO DE INTEGRACIÓN DE LOS  
VEHÍCULOS DE MOVILIDAD PERSONAL  
(VMP) EN UN ÁREA RESIDENCIAL URBANA**

**Autor:**

**Isla Lorenzo, Laura**

**Tutor:**

**Pérez Blanco, Esteban**

**Departamento de Ciencia de los  
Materiales e Ingeniería  
Metalúrgica, Expresión Gráfica en  
la Ingeniería, Ingeniería  
Cartográfica, Geodesia y  
Fotogrametría, Ingeniería  
Mecánica e Ingeniería de los  
Procesos de Fabricación**

**Valladolid, Febrero y 2019.**





## AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar quiero agradecerle a mi tutor, Esteban Pérez, toda la ayuda, apoyo y motivación durante estos meses, sobre todo en los momentos en los que más perdida me encontraba.*

*Gracias a mi madre y a mi hermana por absolutamente todo, por apoyarme tantísimo, tener una paciencia infinita conmigo, sus miles de sacrificios y su amor incondicional.*

*Gracias a Néstor por ser tan imprescindible en estos cuatro años de carrera y estar siempre a mi lado.*

*Gracias a mi padre por ser el pequeño impulso que me animó a estudiar esta carrera.*

*A Emma, a David y a Julio David por animarme siempre y hacerme ver la parte positiva de todo. A Álvaro por hacer que los días de clase y de estudio sean mucho más divertidos.*

*Y gracias a toda mi familia en general por preocuparse siempre por mí y ayudarme cuando lo he necesitado.*





*“Patinete eléctrico” en el año 1916.*

*Los fracasos que tengamos hoy, pueden ser el éxito de otros mañana.*



## **RESUMEN**

En el año 2018 cinco personas perdieron la vida en España entre los 273 accidentes ocurridos en los que estuvieron implicados patinetes eléctricos y este número podría triplicarse en 2019. Debido a que la sociedad ha ido por delante de la Administración no existe aún una norma que regule el uso de los vehículos de movilidad personal (VMP) –como los patinetes eléctricos–.

Este proyecto tiene como objetivo buscar una solución a esta nueva demanda de tráfico de los VMP y estudiar su correcta integración en un área residencial urbana como es el barrio de la Rondilla.

Con ayuda del software de simulación AIMSUN se ha creado un modelo de la situación actual del barrio para poder compararlo con el resto de propuestas simuladas, que incluirán un carril adicional a lo largo de la Avenida Palencia destinado para este nuevo tipo de vehículos.

## **PALABRAS CLAVE**

Tráfico, Rondilla, AIMSUN, Simulación, Análisis, Vehículos, Vehículos de movilidad personal.





## **ABSTRACT**

In 2018, five people lost their lives in Spain among the 273 accidents that involved electric scooters and this number could triple in 2019. Due to society has gone ahead of the Administration, there are still no laws that regulate the personal mobility vehicles' use -such as electric scooters-.

This project aims to find a solution to this new traffic demand for VMP and study its correct integration in an urban residential area such as La Rondilla neighborhood.

With the help of AIMSUN simulation software, a model of the current situation of the neighborhood has been created to be able to compare it with the rest of the simulated proposals, which will include an additional lane along Palencia Avenue destined for this new type of vehicles.

## **KEYWORDS**

Traffic, Rondilla, AIMSUN, Simulation, Analysis, Vehicles, Personal mobility vehicles.





# ÍNDICE DE CONTENIDOS

*Págs.*

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>19</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	19
1.2. OBJETIVOS.....	20
1.3. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....	21
<b>CAPÍTULO 2. INGENIERÍA DE TRÁFICO.....</b>	<b>23</b>
2.1. CONCEPTOS GENERALES DEL TRÁFICO.....	23
2.1.1. PLANIFICACIÓN VIAL.....	24
2.1.2. ORGANIZACIÓN DE LA INGENIERÍA DE TRÁFICO.....	27
2.1.3. CONCLUSIONES.....	29
2.2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS.....	30
2.2.1. INFRAESTRUCTURAS.....	32
2.2.2. CONCEPTOS GENERALES.....	33
2.2.3. RELACIÓN ENTRE INTENSIDAD Y DENSIDAD.....	37
2.2.4. RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD Y DENSIDAD.....	38
2.2.5. RELACIÓN ENTRE INTENSIDAD Y VELOCIDAD.....	40
2.2.6. RELACIÓN ENTRE LAS COMPONENTES DEL TRÁFICO....	41
2.3. CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO.....	43
2.3.1. CAPACIDAD.....	44
2.3.2. NIVEL DE SERVICIO.....	46
2.3.3. CAPACIDAD EN INTERSECCIONES CON SEMÁFOROS.....	49
2.3.4. CALIDAD DE SERVICIO.....	51
2.4. CONTROL DEL TRÁFICO RODADO.....	51
2.4.1. CANALIZACIÓN.....	53
2.4.2. COMUNICACIONES.....	53
2.4.3. LÍMITES DE VELOCIDAD.....	54
2.5. ESTUDIO Y PLANIFICACIÓN DEL TRÁFICO RODADO.....	55
2.5.1. ESTUDIO DEL TRANSPORTE: AFOROS.....	55



2.5.1.1. OBJETIVOS DE LOS AFOROS.....	56
2.5.1.2. TÉCNICAS DE AFORO.....	56
2.5.2. PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE.....	61
2.5.2.1. ETAPAS DE LA PLANIFICACIÓN.....	63
2.5.2.2. CONCEPTO DE COSTE.....	65
2.5.2.3. ENCUESTAS PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA...	67
2.6. TRÁFICO NO RODADO: MOVILIDAD URBANA.....	70
2.6.1. ASPECTOS INICIALES.....	71
2.6.2. ANÁLISIS DEL NIVEL DE SERVICIO.....	72
2.6.3. PRINCIPIOS DE LA CIRCULACIÓN PEATONAL.....	73
2.6.4. VEHÍCULOS DE MOVILIDAD PERSONAL (VMP).....	74
2.6.4.1. INSTRUCCIÓN 16/V-124.....	74
<b>CAPÍTULO 3: ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL TRÁFICO EN LA</b>	
<b>RONDILLA.....</b>	<b>79</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	79
3.2. PASOS SEGUIDOS EN EL ESTUDIO DEL TRÁFICO EN LA	
RONDILLA.....	83
3.3. DESCRIPCIÓN Y CONTRUCCIÓN DEL MODELO.....	84
3.3.1. SOFTWARE AIMSUN.....	84
3.3.1.1. INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE AIMSUN.....	84
3.3.1.2. DESARROLLO DE UN MODELO AIMSUN.....	85
3.3.2. DATOS DE PARTIDA.....	85
3.3.2.1. MODELADO DE LA DEMANDA DE TRÁFICO.....	94
3.3.3. TIPO DE MODELO.....	101
3.3.4. VALIDACIÓN DEL MODELO.....	102
3.4. ANÁLISIS DEL MODELO REAL SIMULADO.....	104
3.4.1. MAPAS DE FLUJO.....	105
3.4.2. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS GLOBALES.....	106
3.4.3. CARACTERÍSTICAS DE LA RED.....	113



3.5. PROPUESTAS DE NUEVOS MODELOS DE TRÁFICO.....	116
3.5.1. COMPARACIÓN SITUACIÓN DEL AÑO OBJETIVO SIN CARRIL ADICIONAL Y SITUACIÓN DEL AÑO OBJETIVO CON CARRIL ADICIONAL DEL VEHÍCULO TIPO COCHE.....	117
3.5.1.1. MAPAS DE FLUJO.....	119
3.5.1.2. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS GLOBALES.....	120
3.5.1.3. CARACTERÍSTICAS DE LA RED.....	124
3.5.2. COMPARACIÓN SITUACIÓN DEL AÑO OBJETIVO CON CARRIL ADICIONAL Y AUMENTO DE LOS VMP Y DISMINUCIÓN DE VEHÍCULOS A MOTOR DEL VEHÍCULO TIPO COCHE.....	127
3.5.2.1. MAPAS DE FLUJO.....	128
3.5.2.2. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS GLOBALES.....	130
3.5.2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA RED.....	135
3.5.3. COMPARACIÓN DEL TRÁFICO DE LOS VEHÍCULOS DE MOVILIDAD PERSONAL EN EL MODELO CON CARRIL ADICIONAL Y EN EL MODELO ESTABLE DEL VEHICULO TIPO PATINETE.....	139
3.5.3.1. MAPAS DE FLUJO.....	140
3.5.3.2. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS GLOBALES.....	142
3.5.3.3. CARACTERÍSTICAS DE LA RED.....	148
3.6. RESULTADOS.....	152
<b>CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES.....</b>	<b>154</b>
4.1. CONCLUSIONES.....	154
4.2. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....	157
<b>CAPÍTULO 5: ESTUDIO ECONÓMICO.....</b>	<b>159</b>
5.1. INTRODUCCIÓN.....	159
5.2. CÁLCULOS.....	159
5.2.1. COSTES DIRECTOS.....	159



5.2.1.1. COSTES DE PERSONAL.....	160
5.2.1.2. COSTES DE AMORTIZACIÓN DE MATERIAL.....	164
5.2.1.3. COSTES DE MATERIALES CONSUMIBLES.....	167
5.2.1.4. COSTES TOTALES DIRECTOS.....	168
5.2.2. COSTES INDIRECTOS.....	168
5.3. COSTE TOTAL DEL PROYECTO.....	169
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>171</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>174</b>



# ÍNDICE DE FIGURAS

*Págs.*

<b>CAPÍTULO 2. INGENIERÍA DE TRÁFICO.....</b>	
<i>Figura 2.1. Relación intensidad-densidad (Balaguer).....</i>	31
<i>Figura 2.2. Relación velocidad-densidad (Balaguer).....</i>	39
<i>Figura 2.3. Relación velocidad-intensidad (Balaguer).....</i>	41
<i>Figura 2.4. Relación fundamental del tráfico.....</i>	43
<i>Figura 2.5. Capacidad máxima de un carril.....</i>	46
<i>Figura 2.6. Niveles de servicio. ....</i>	48
<b>CAPÍTULO 3: ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL TRÁFICO EN LA RONDILLA.....</b>	79
<i>Figura 3.1. Mapa de situación de Valladolid.....</i>	80
<i>Figura 3.2. Mapa barrio de la Rondilla.....</i>	81
<i>Figura 3.3. Distribución de los viajes según hora de inicio.....</i>	83
<i>Figura 3.4. Mapa de la zona de estudio. ....</i>	86
<i>Figura 3.5. Mapa de la zona de estudio.....</i>	87
<i>Figura 3.6. Mapa de la zona de estudio.....</i>	88
<i>Figura 3.7. Nodo 118181.....</i>	89
<i>Figura 3.8. Propiedades del Nodo 118181.....</i>	90
<i>Figura 3.9. Situación de semáforos en la intersección de la Av. Palencia y la C/ Penitencia.....</i>	91
<i>Figura 3.10. Diagrama de fases Av. Palencia y C/Penitencia.....</i>	92
<i>Figura 3.11. Plan de control del Nodo 118181.....</i>	93
<i>Figura 3.12. Plan de control del Nodo 21431.....</i>	94
<i>Figura 3.13. Representación 2D del coche en AIMSUN.....</i>	95
<i>Figura 3.14. Representación 2D del autobús en AIMSUN.....</i>	95
<i>Figura 3.15. Representación 2D de los VMP en AIMSUN.....</i>	95
<i>Figura 3.16. Lugares donde se realizaron las encuestas.....</i>	97
<i>Figura 3.17. Matrices O/D.....</i>	98
<i>Figura 3.18. Distribución de los viajes según hora de comienzo y modo básico.....</i>	100



<b>Figura 3.19.</b> Representación de valores (x, y).....	102
<b>Figura 3.20.</b> Validación de la simulación del modelo real.....	104
<b>Figura 3.21.</b> Leyenda mapa de flujo (veh/h).....	105
<b>Figura 3.22.</b> Mapa de flujo de la simulación real (veh/h).....	105
<b>Figura 3.23.</b> Flujo de vehículos (veh/h). ....	107
<b>Figura 3.24.</b> Longitud media de cola virtual (vehs). ....	108
<b>Figura 3.25.</b> Longitud máxima de cola virtual (vehs). ....	108
<b>Figura 3.26.</b> Tiempo de demora (segundos/km). ....	110
<b>Figura 3.27.</b> Velocidad (km/h).....	111
<b>Figura 3.28.</b> Tiempo de viaje (s/km).....	112
<b>Figura 3.29.</b> Número de paradas.....	114
<b>Figura 3.30.</b> Tiempo de parada (s/km).....	114
<b>Figura 3.31.</b> Distancia total viajada (km). ....	115
<b>Figura 3.32.</b> Tiempo total de viaje (segundos).....	116
<b>Figura 3.33.</b> Modelo sin carril de los coches.....	119
<b>Figura 3.34.</b> Modelo con carril de los coches.....	119
<b>Figura 3.35.</b> Comparación flujo de vehículos (veh/h) de los coches.....	120
<b>Figura 3.36.</b> Comparación longitud media de cola virtual (vehs) de los coches.....	121
<b>Figura 3.37.</b> Comparación tiempo de demora (s/km) de los coches.....	123
<b>Figura 3.38.</b> Comparación velocidad (km/h) de los coches.....	124
<b>Figura 3.39.</b> Comparación número de paradas de los coches.....	125
<b>Figura 3.40.</b> Comparación tiempo de parada (s/km) de los coches.....	125
<b>Figura 3.41.</b> Comparación distancia total viajada (km) de los coches.....	126
<b>Figura 3.42.</b> Mapa de flujo modelo con carril de los coches.....	128
<b>Figura 3.43.</b> Mapa de flujo modelo estable de los coches.....	129
<b>Figura 3.44.</b> Comparación flujo de vehículos (veh/h) de los coches.....	130
<b>Figura 3.45.</b> Comparación longitud media de cola virtual (vehs) de los coches.....	131
<b>Figura 3.46.</b> Comparación tiempo de demora (s/km) de los coches.....	133
<b>Figura 3.47.</b> Comparación velocidad (km/h) de los coches.....	134



<i>Figura 3.48. Comparación número de paradas de los coches.....</i>	136
<i>Figura 3.49. Comparación tiempo de parada (s/km) de los coches.....</i>	136
<i>Figura 3.50. Comparación distancia total viajada (km) de los coches.....</i>	137
<i>Figura 3.51. Comparación tiempo total de viaje (km) de los coches.....</i>	138
<i>Figura 3.52. Mapa de flujo modelo con carril de los VMP.....</i>	140
<i>Figura 3.53. Mapa de flujo modelo estable de los VMP.....</i>	141
<i>Figura 3.54. Comparación flujo de vehículos (veh/h) de los VMP.....</i>	142
<i>Figura 3.55. Comparación longitud media de cola virtual (vehs) de los VMP.....</i>	143
<i>Figura 3.56. Comparación tiempo de demora (s/km) de los VMP.....</i>	145
<i>Figura 3.57. Comparación velocidad (km/h) de los VMP.....</i>	146
<i>Figura 3.58. Comparación número de paradas. ....</i>	148
<i>Figura 3.59. Comparación tiempo de parada (s/km) de los VMP.....</i>	148
<i>Figura 3.60. Comparación distancia total viajada (km) de los VMP.....</i>	150
<b>CAPÍTULO 5: ESTUDIO ECONÓMICO.....</b>	159
<i>Figura 5.1. Coste total del proyecto por conceptos.....</i>	170
<b>ANEXOS.....</b>	174
<i>Figura A.1. Mapa de ubicación espiras permanentes.....</i>	175
<i>Figura A.2. Mapa de intersecciones semaforicas de la Rondilla.....</i>	178
<i>Figura A.3. Cruce 202- C/Rondilla de Santa Teresa- C/Mirabel.....</i>	179
<i>Figura A.4. Diagrama de fase del cruce 202- C/Rondilla de Santa Teresa- C/Mirabel.....</i>	179
<i>Figura A.5. Cruce 203- C/Rondilla de Santa Teresa- C/Cardenal Torquemada.....</i>	180
<i>Figura A.6. Diagrama de fases del cruce 203- C/Rondilla de Santa Teresa- C/Cardenal Torquemada.....</i>	180
<i>Figura A.7. Cruce 204- C/Gondomar- C/Santa Clara.....</i>	181
<i>Figura A.8. Diagrama de fases del cruce 204- C/Gondomar- C/Santa Clara.....</i>	181
<i>Figura A.9. Cruce 220- Avda. de Palencia - C/Amor de Dios.....</i>	182
<i>Figura A.10. Diagrama de fases del cruce 220- Avda. de Palencia - C/Amor de</i>	



Dios.....	182
<b>Figura A.11.</b> Cruce 221- Avda. de Palencia - C/Penitencia.....	183
<b>Figura A.12.</b> Diagrama de fases del cruce 221- Avda. de Palencia - C/Penitencia...	183
<b>Figura A.13.</b> Cruce 222- Avda. de Palencia - C/Real de Burgos.....	184
<b>Figura A.14.</b> Diagrama de fases del cruce 222- Avda. de Palencia - C/Real de Burgos.....	184
<b>Figura A.15.</b> Cruce 226- C/Cardenal Torquemada – C/Tirso de Molina.....	185
<b>Figura A.16.</b> Diagrama de fases del cruce 226- C/Cardenal Torquemada – C/Tirso de Molina.....	185
<b>Figura A.17.</b> Cruce 227- C/Cardenal Torquemada – C/Cardenal Cisneros.....	186
<b>Figura A.18.</b> Diagrama de fases del cruce 227- C/Cardenal Torquemada – C/Cardenal Cisneros.....	186
<b>Figura A.19.</b> Cruce 228- C/Cardenal Cisneros – C/Las Moradas.....	187
<b>Figura A.20.</b> Diagrama de fases del cruce 228- C/Cardenal Cisneros – C/Las Moradas.....	187
<b>Figura A.21.</b> Cruce 229- C/Cardenal Cisneros – C/Portillo de Balboa.....	188
<b>Figura A.22.</b> Diagrama de fases del cruce 229- C/Cardenal Cisneros – C/Portillo de Balboa.....	188
<b>Figura A.23.</b> Cruce 230- C/Soto - C/Cardenal Torquemada.....	189
<b>Figura A.24.</b> Diagrama de fases del cruce 230- C/Soto - C/Cardenal Torquemada.	189
<b>Figura A.25.</b> Cruce 231- C/Soto - C/Portillo de Balboa.....	190
<b>Figura A.26.</b> Diagrama de fases del cruce 231- C/Soto - C/Portillo de Balboa.....	190
<b>Figura A.27.</b> Cruce 232- C/Cardenal Torquemada – C/Portillo de Balboa.....	191
<b>Figura A.28.</b> Diagrama de fases del cruce 232- C/Cardenal Torquemada – C/Portillo de Balboa.....	191



# ÍNDICE DE TABLAS

*Págs.*

<b>CAPÍTULO 2. INGENIERÍA DE TRÁFICO.....</b>	<b>23</b>
<i>Tabla 2.1. Niveles de servicio en vías urbanas.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 2.2. Impreso del MOPT para la realización de aforos manuales.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 2.3. Clasificación de VMP.....</i>	<i>78</i>
<b>CAPÍTULO 3: ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL TRÁFICO EN LA</b>	
<b>RONDILLA.....</b>	<b>79</b>
<i>Tabla 3.1. Datos de aforo permanente expresados en IMD, vehículos/día.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 3.2. Valores medios de los parámetros globales.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 3.3. Valores medios de los parámetros de la red.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 3.4. Comparación valores medios de flujo de vehículos de los coches.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 3.5. Comparación valores medios de longitud media de cola virtual de los coches.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 3.6. Comparación valores medios de tiempo de demora de los coches.....</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 3.7. Comparación valores medios de velocidad de los coches.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 3.8. Comparación valores medios de número de paradas y tiempo de parada de los coches.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 3.9. Comparación valores medios de velocidad de los coches.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 3.10. Comparación valores medios de flujo de vehículos de los coches.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 3.11. Comparación valores medios de longitud media de cola virtual de los coches.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 3.12. Comparación valores medios de tiempo de demora de los coches.....</i>	<i>134</i>
<i>Tabla 3.13. Comparación valores medios de velocidad de los coches.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 3.14. Comparación valores medios de número de paradas y tiempo de parada de los coches.....</i>	<i>137</i>
<i>Tabla 3.15. Comparación valores medios de velocidad de los coches.....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 3.16. Comparación valores medios de tiempo total de viaje de los coches....</i>	<i>139</i>
<i>Tabla 3.17. Comparación valores medios de flujo de vehículos de los VMP.....</i>	<i>143</i>



<b>Tabla 3.18.</b> Comparación valores medios de longitud media de cola virtual de los VMP.....	144
<b>Tabla 3.19.</b> Comparación valores medios de tiempo de demora de los VMP.....	146
<b>Tabla 3.20.</b> Comparación valores medios de velocidad de los VMP.....	147
<b>Tabla 3.21.</b> Comparación valores medios de número de paradas y tiempo de parada de los VMP.....	150
<b>Tabla 3.22.</b> Comparación valores medios de distancia total viajada de los VMP....	151
<b>Tabla 3.23.</b> Resultados de la simulación de los coches.....	152
<b>Tabla 3.24.</b> Resultados de la simulación de los VMP.....	153
<b>CAPÍTULO 5: ESTUDIO ECONÓMICO.....</b>	159
<b>Tabla 5.1.</b> Horas efectivas de trabajo.....	160
<b>Tabla 5.2.</b> Sueldo y coste horario del Director del proyecto.....	161
<b>Tabla 5.3.</b> Sueldo y coste horario del Ingeniero.....	161
<b>Tabla 5.4.</b> Número de horas invertidas por cada integrante. ....	162
<b>Tabla 5.5.</b> Coste total de personal.....	163
<b>Tabla 5.6.</b> Costes y vida útil del material utilizado.....	164
<b>Tabla 5.7.</b> Coste de amortización.....	165
<b>Tabla 5.8.</b> Coste de material.....	166
<b>Tabla 5.9.</b> Total de costes directos.....	167
<b>Tabla 5.10.</b> Total de costes indirectos.....	168
<b>Tabla 5.11.</b> Coste total del proyecto.....	169
<b>ANEXOS.....</b>	174
<b>Tabla A.1.</b> Datos de espiras en IMD anual.....	176



# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1. INTRODUCCIÓN

*“El transporte es considerado una actividad entendida como el desplazamiento de objetos, animales o personas de un lugar a otro en un vehículo que utiliza una determinada infraestructura.”*

Para el hombre el transporte es un recurso básico de valoración y se puede orientar según unas características sociales y unas características industriales, está enfocado a la consecución de un fin.

El impacto del vehículo en la actualidad ha condicionado los modos de transporte, la configuración de las ciudades, la organización industrial, la agricultura, el turismo y la ordenación territorial. Para el estudio del planeamiento, trazado, funcionamiento y señalización de las calles y carreteras, así como de los aparcamientos, terrenos colindantes y zonas de influencia y de su regulación con otros medios de transporte surgió la Ingeniería del Transporte.

El objetivo de la Ingeniería del Transporte es que el movimiento de personas y mercancías se realice de la forma más segura, eficaz y cómoda para obtener el mayor rendimiento posible de las vías existentes.

Una de las herramientas más fuertes de las que disponen los ingenieros del transporte para gestionar la circulación son las señales de tráfico – señales viales, semáforos, señales verticales de circulación y marcas viales – mediante las cuales se transmite a los usuarios de las vías unas normas previamente estudiadas que están obligados a cumplir.

Algunos de los aspectos que dificultan la correcta ordenación del tráfico para hacer posible una circulación sencilla son:

- La saturación de las calles y carreteras que impiden una circulación fluida en ellas.

- El impacto negativo a los que menos se benefician directamente de su uso, unas veces los peatones y otras las personas que viven o trabajan en sus inmediaciones.
- La cultura y educación de los usuarios de las vías, es decir, la responsabilidad de cada uno de ellos para cumplir las normas generales que regulan la circulación.

La concentración de los vehículos de movilidad personal (VMP), en su mayoría patinetes eléctricos, ha aumentado muy rápidamente en los dos últimos años y la mayoría de las infraestructuras no está planificada para su correcta circulación. Esto lleva a la gran cantidad de accidentes que se han producido, en concreto, en 2018 el patinete eléctrico ha estado implicado en 273 accidentes, uno de ellos mortal al impactar con un turismo.

Con este Trabajo de Fin de Grado se estudiará la situación actual en el barrio de la Rondilla y se intentará proponer alternativas viables al problema de movilidad diario que existe en la interacción del tráfico rodado con los VMP. A partir del modelo de simulación que muestra el tráfico que hay hoy en día en la zona a estudiar, se creará un nuevo modelo dónde incluiremos un carril adicional a lo largo de la Avenida Palencia destinado tanto para la circulación de bicicletas, que ya se encuentra en un sentido actualmente, como para la circulación de los VMP. Este carril para cada sentido se une en la Calle Real de Burgos dónde se realizará un ensanchamiento del carril de bicicletas del que ya se dispone.

## 1.2. OBJETIVOS

Los objetivos de este proyecto son los siguientes:

- Desarrollar un modelo con el programa AIMSUN para el estudio del tráfico en el barrio de la Rondilla que permita simular diferentes situaciones, analizando los siguientes casos:



- El estudio del tráfico en la Rondilla actualmente, sin incluir ningún cambio para analizar el flujo y la situación de hora punta.
  - El estudio del tráfico en la Rondilla con las previsiones de aumento o disminución de la demanda para el año objetivo del proyecto que serán en el 2021.
  - El análisis del tráfico en el barrio después de la apertura del carril adicional en la Avenida Palencia para la circulación de los vehículos de movilidad personal y bicicletas.
  - La influencia de la nueva demanda de tráfico de VMP sobre la demanda de tráfico de los coches.
  - El estudio del aumento en la demanda de los VMP.
- 
- Estudiar las posibilidades que nos ofrece el software AIMSUN comparando el análisis de los parámetros que nos ofrecen los modelos simulados con los resultados de la realidad. Analizar la capacidad del software AIMSUN, su aprendizaje y manejo.
  - Analizar la interacción entre el flujo de transporte privado en vehículo ligero y el flujo de VMP.
  - Proponer una posible solución al previsible problema de alta demanda de tráfico de los vehículos de movilidad personal (VMP), en concreto los patinetes eléctricos.

### **1.3. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA**

La siguiente memoria recoge los resultados que se han obtenido en la realización de este Trabajo de Fin de Grado. Se estructura en cinco capítulos y un anexo:

- Capítulo 1: Introducción, donde se presenta el tema y se plantean los objetivos.



- Capítulo 2: Aspectos teóricos de la Ingeniería de tráfico en la que se definen los conceptos fundamentales.
- Capítulo 3: Calibración y validación del modelo de tráfico a través de la primera simulación. Simulación del resto de los modelos y análisis de los resultados.
- Capítulo 4: Conclusiones que se obtienen de este proyecto y nuevas líneas de trabajo y mejora en el futuro.
- Capítulo 5: Estudio económico del proyecto donde se muestran los diferentes cálculos de costes.
- Anexo de los datos facilitados por el Gabinete de Movilidad del Ayuntamiento de Valladolid.
- Bibliografía, libros, proyectos, páginas web consultadas y artículos periodísticos.



## CAPÍTULO 2. INGENIERÍA DE TRÁFICO

### 2.1. CONCEPTOS GENERALES DEL TRÁFICO

La **Ingeniería de Tráfico** se define como *“la rama de la Ingeniería que trata del planeamiento, trazado y funcionamiento de las calles y carreteras, así como de los aparcamientos, terrenos colindantes y zonas de influencia y de su relación con otros medios de transporte. Su objetivo final es que el movimiento de personas y mercancías se realice de la forma más segura, eficaz y cómoda”* (Instituto de Ingenieros de Tráfico de los Estados Unidos).

Esta definición expone los campos que competen a la Ingeniería de Tráfico, desde la solución de pequeños problemas locales, hasta la elaboración de complejos planes de transportes, y que ha sido aceptada universalmente.

La ingeniería de Tráfico es, por tanto, una nueva técnica que se inicia en el segundo tercio del siglo XX, surgió como consecuencia de nuevas necesidades para el bienestar del hombre y para hacer posibles distintas formas de convivencia.

La Ingeniería de Tráfico en sus inicios se orientó hacia el campo de la ordenación de la circulación y de la seguridad vial, de forma que se pudiera conseguir un mayor rendimiento de las calles existentes, lo que implicaba a la policía. Sin embargo, a medida que fueron evolucionando los problemas de tráfico y con ellos la Ingeniería de Tráfico, se fueron imponiendo los criterios ingenieriles, de forma que esta se ha encaminado más hacia las funciones de planteamiento y trazado, centrándose en el campo del desarrollo y la regulación del transporte.

Las actividades de la Ingeniería de Tráfico pueden dividirse en dos grandes grupos, que están bien diferenciados, aunque tengan muchos aspectos comunes.



*El primer grupo* corresponde a lo que puede llamarse Planificación de tráfico, muy relacionado con otras técnicas como la Estadística o las Matemáticas, y otras ramas de la Ingeniería, Sociología, Economía, y que generalmente trata de problemas a largo plazo o al menos no de acción inmediata.

*El segundo grupo*, que ha sido el origen de esta rama de la Ingeniería, abarca la Ordenación de la circulación y normalmente se dedica al estudio de actuaciones que se producen inmediatamente. El objetivo de este segundo grupo es lograr el máximo rendimiento de las redes viarias existentes, sin que haya modificaciones en su estructura o que sean lo más pequeño posible.

Hoy en día el transporte se tiende a contemplar en todas sus formas de la manera más amplia posible, ya que, en las zonas urbanas, no pueden aceptarse soluciones parciales que sólo se refieran al problema de la circulación de los vehículos.

### **2.1.1. PLANIFICACIÓN VIAL**

El tráfico es un factor básico en la planificación de las carreteras y calles, puesto que en definitiva uno de los principales objetos de éstas es servir eficazmente a la circulación.

Por ello, en todos los trabajos de planificación de infraestructura, la Ingeniería de Tráfico ha de tener una participación importante, en colaboración con otras técnicas. A continuación se explican los aspectos de la actuación de la Ingeniería de Tráfico en relación con su planificación.

- **Recogida y análisis de datos.**

En primer lugar para abordar técnicamente un problema es necesario conocerlo de manera objetiva. No es posible actuar solamente sobre



hipótesis, aunque parezcan evidentes, puesto que los datos objetivos son la base de todo trabajo científico o ingenieril.

Los datos pueden ser recogidos por cualquiera, pero precisamente uno de los éxitos de la Ingeniería de Tráfico ha sido la puesta a punto de procedimientos muy bien calibrados para que con un coste mínimo sea posible obtener precisamente aquellos datos básicos que permiten tomar las medidas adecuadas.

La técnica de la recogida de datos se ha desarrollado hasta tal punto, que muchas veces se confunde la misión del ingeniero con la simple realización de unos aforos, o con la preparación de una encuesta, olvidando que dentro de sus funciones esto sólo representa un primer paso para conseguir los objetivos esenciales: el análisis crítico de las situaciones existentes y la aplicación de los resultados de los estudios a soluciones concretas de los problemas de planificación u ordenación que se hayan planteado.

Hay que tener en cuenta que una excesiva acumulación de datos representa un coste inútil y puede desviar la actuación de los ingenieros de sus objetivos más importantes.

A la hora de hacer análisis de las redes de transporte hay que tener en cuenta que puede haber muchos datos y que eso será un problema. Para la obtención de datos hay que buscar un modelo que permita pasar de la ciudad a un ordenador con la menor inversión posible.

1. Partimos del mapa de vías o carreteras.
2. Transformamos el mapa en un conjunto de nodos y eslabones (unidireccionales o bidireccionales).
3. Matriz de conectividades: colocamos en las filas todos los orígenes y en las columnas los destinos.
4. Creamos el vector de información para cada eslabón: longitud, capacidad y tiempo de recorrido.



- **Planificación vial y de transportes.**

La planificación de las estructuras viarias y de los sistemas de transportes en general -urbanos o interurbanos- y el estudio y comprobación de su comportamiento futuro es una de las tareas esenciales de la Ingeniería de Tráfico.

En este campo se impone la cooperación con otras técnicas, como la Economía y Urbanismo y en muchos casos los sistemas de transporte, que no siempre son factores decisivos, pero sí condicionantes esenciales, pueden imponer la solución, aunque no sea la más conveniente desde otros puntos de vista.

En las zonas urbanas especialmente, el transporte, complicado extraordinariamente desde la aparición del vehículo privado, ha hecho evolucionar muchos conceptos esenciales de la estructura de la ciudad. El problema existe tanto en las nuevas zonas urbanas como en las ciudades ya construidas, siendo todavía más grave en este último caso, en que las estructuras urbanas han sido concebidas antes de que existiesen los automóviles.

- **Trazado.**

En el trazado de las calles y carreteras, especialmente en lo que se refiere a sus intersecciones y enlaces, la Ingeniería de Tráfico tiene un papel esencial.

Aunque muchos de los detalles de la técnica del trazado no son específicos de esta rama de la Ingeniería es preciso que los ingenieros que realizan los proyectos de trazado tengan una formación suficiente en tráfico y, en todo caso, es muy conveniente que algún ingeniero especialista en tráfico intervenga en la revisión de los planos finales.



Puede pues, considerarse como muy conveniente que los ingenieros de tráfico tengan, de forma más o menos directa, alguna intervención en las etapas finales del proyecto, al que deben aportar su visión de la explotación de la obra, completando su intervención en la planificación funcional.

## 2.1.2. ORGANIZACIÓN DE LA INGENIERÍA DE TRÁFICO

La **Ingeniería de Tráfico** puede prestar servicios a organismos de varios tipos como los que se detallan a continuación:

- Administraciones de carreteras, a escala nacional o provincial, en las que su campo de actuación está en relación con la planificación y ordenación del tráfico fuera de las zonas urbanas.
- Municipios con problemas de ordenación de tráfico y de planificación urbana.
- Administraciones que controlan el urbanismo a escala nacional, regional, provincial y local, en las que los especialistas de tráfico están integrados en los equipos politécnicos que redactan o controlan los planes.
- Laboratorios y Centros de Investigación que no están al servicio directo de los organismos responsables de la administración y gestión del tráfico.
- Determinados organismos privados, como empresas de transportes o distribuidoras de carburantes y también empresas de ingenieros consultores, que trabajan para alguno de los Organismos antes mencionados.

Si hablamos de la organización a escala municipal, hay que hacer notar que en casi todas las ciudades de más de 100.000 habitantes, e incluso en algunas de menor importancia existen serios problemas de circulación y estacionamiento. Estos problemas se agravan continuamente, porque los



parques de vehículos crecen rápidamente y las condiciones físicas de las ciudades mejoran muy poco a poco y a veces, son prácticamente invariables.

Los primeros problemas de ordenación de tráfico suelen encomendarse a la policía con muy poca intervención de los ingenieros, pero en todos los países se observa la tendencia de que, al aumentar las dificultades, se acude a la Ingeniería de Tráfico, aunque ésta no puede resolver muchos de los problemas cuyo origen está en la planificación de la propia ciudad.

Si se consolida la tendencia que ahora se inicia de tener en cuenta el tráfico en la planificación urbana, será fácil que en las futuras zonas urbanas sea posible ordenar la circulación más eficazmente. Aunque en ciudades importantes, incluso con una planificación bien establecida, no puede evitarse que en un cierto futuro hayan de imponerse determinadas limitaciones al uso de los vehículos privados.

Las primeras actividades de la Ingeniería de Tráfico, estuvieron dedicadas a resolver los problemas de ordenación y aun actualmente, éstos ocupan la atención preferente de la mayor parte de los ingenieros.

Son funciones típicas de esta actividad, el estudio de medidas tales como, la señalización de las calles, el establecimiento de sentidos únicos, el control del estacionamiento y la prohibición de giros, todas ellas encaminadas a obtener un mayor rendimiento de las vías existentes. El arma fundamental de que disponen los ingenieros de tráfico para ordenar la circulación es la señalización -semáforos, señales, y marcas viales- mediante la cual se orienta y obliga a los conductores a cumplir las normas previamente estudiadas.

La correcta ordenación del tráfico es siempre necesaria para hacer posible una circulación segura. Pero a medida que se saturan las carreteras y las calles, aparece una segunda razón que justifica extremar el cuidado de la ordenación: hacer posible una circulación fluida. Esta segunda razón exige medidas más afinadas y ha contribuido decisivamente al considerable



desarrollo de la Ingeniería de Tráfico en todo el mundo, siendo su actuación imprescindible, especialmente para la ordenación de las zonas urbanas.

Una tercera razón aconseja acentuar el cuidado en la ordenación del tráfico: mejorar la integración de la vía en su entorno y reducir su impacto negativo en los que menos se benefician directamente de su uso, una veces los peatones y otras las personas que viven o trabajan en sus inmediaciones.

Por último, en la revisión y puesta a punto de las normas generales que regulan la circulación, tiene también un papel esencial la Ingeniería de Tráfico. A medida que surgen problemas nuevos, es preciso modificar las normas que hayan de aplicarse, generalmente en el sentido de imponer mayores restricciones a determinados usuarios para conseguir un beneficio general.

### **2.1.3. CONCLUSIONES**

La Ingeniería de Tráfico está sometida a una intensa y continua evolución. Esta evolución se presenta fundamentalmente orientada hacia una mayor amplitud de su campo de acción y a una mayor tendencia al establecimiento de leyes más o menos elaboradas.

Cuando llegó a Europa desde Estados Unidos, la Ingeniería de Tráfico era exclusivamente empírica, basada generalmente en una enorme masa de datos y observando a posteriori cómo se cumplen unas determinadas leyes empíricas, que constituyen luego la base de la nueva técnica, sin tratar de justificar teóricamente las leyes que resultan. Los ingenieros europeos generalmente con mayor preparación teórica y matemática, pero con menos medios para reunir y analizar datos, tratan de llegar a leyes análogas basándose en razonamientos teóricos, matemáticamente justificados y así cada día la Ingeniería de Tráfico se enriquece con teorías más razonadas.



La Ingeniería de Tráfico surgió en América como una consecuencia más de la expansión del automóvil privado, en unos momentos en los que aparentemente este se iba a convertir en el único medio de transporte.

Sin embargo en las ciudades europeas y también en algunas americanas, se observó que el automóvil creaba problemas insolubles, resultando evidente la necesidad de estudiar conjuntamente la solución del transporte privado y del colectivo. Existe ya una tendencia clara a extender el campo de la Ingeniería de Tráfico al más amplio de los transportes.

Estas técnicas se complican más ya que se ha comprobado que no es posible aislar el problema del transporte de otros aspectos del urbanismo. Ello hace que la Ingeniería de Tráfico se vaya implicando más con el urbanismo, hasta el punto que la técnica del tráfico o del transporte ya no es sólo una rama más de la Ingeniería sino que se está convirtiendo en un aspecto fundamental del urbanismo incluyéndose especialistas en tráfico y transportes en los equipos dedicados al urbanismo.

## 2.2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

Para comprender correctamente todo lo que vamos a tratar en el siguiente estudio es necesario desarrollar brevemente algunos de los conceptos técnicos más importantes.

El sistema de transporte es un conjunto de elementos que se usa con el objetivo de dar movilidad, estos elementos están tan interrelacionados entre ellos que si se provocan cambios en uno de ellos afectará al resto.

Las partes del sistema de transporte se clasifican en tres tipos de elementos:

- *Elementos fijos*: dan soporte al funcionamiento del sistema y son sobre los que se va a realizar el desplazamiento.



- Eslabones: son los elementos que unen dos puntos y aportan la distancia. Pero en ellos no se pueden hacer cambios de dirección ni de sentido.
- Nodos: Son los que permiten cambiar la dirección y/o el sentido uniendo o separando los flujos.
- Terminales: permiten la posibilidad directa de entrada y salida.
- *Elementos móviles*: se mueven sobre los fijos.
  - Objeto: carga o persona que queremos mover.
  - Vehículo: aporta la movilidad a través de la fuerza motriz.
  - Contenedor: asociado unívocamente al vehículo.
- *El sistema de control*: define el modo de funcionamiento. La unión eficiente y segura entre elementos fijos y móviles, son las “reglas del juego”.

A la hora de hacer análisis de las redes de transporte hay que tener en cuenta que puede haber muchos datos y que eso será un problema. Para la obtención de datos hay que buscar un modelo que permita pasar de la ciudad a un ordenador con la menor inversión posible.

1. Partimos del mapa de vías o carreteras.
2. Transformamos el mapa en un conjunto de nodos y eslabones (unidireccionales o bidireccionales).
3. Matriz de conectividades: colocamos en las filas todos los orígenes y en las columnas los destinos.
4. Creamos el vector de información para cada eslabón: longitud, capacidad y tiempo de recorrido.



## 2.2.1 INFRAESTRUCTURAS

El sistema de transporte está integrado por una infraestructura por la que circulan los vehículos de transporte. Esta infraestructura se clasifica en función de dos categorías de flujo:

- *Flujo ininterrumpido o continuo*: las infraestructuras de flujo ininterrumpido no tienen elementos fijos, como por ejemplo semáforos o señales de alto, externos al flujo del tráfico y que puedan interrumpir el flujo. La manera de circulación es el resultado de la interacción entre los vehículos, las características geométricas y medioambientales de la carretera. Se produce en autopistas, vías expresas y carreteras. Las principales variables del flujo continuo son volumen, densidad y velocidad y la relación entre ellas se expresa mediante la relación fundamental del flujo continuo.
- *Flujo interrumpido*: las infraestructuras del flujo interrumpido tienen elementos fijos que pueden interrumpir el flujo del tráfico. Estos elementos obligan a parar el tráfico de forma periódica o a reducir la velocidad. Es el característico de las calles, utilizado para el tránsito urbano.

La calidad de la circulación no influye en el tipo de infraestructura. Es decir, si una autopista se encuentra en un momento dado con una extrema congestión del tráfico sigue siendo una infraestructura de flujo ininterrumpido ya que las causas de la congestión son internas a la circulación (accidente, colisión, avería), es independiente del tipo de infraestructura.

Al realizar el análisis de los elementos del flujo interrumpido se debe tener en cuenta el impacto de los elementos fijos. La capacidad queda limitada no solo por el espacio físico proporcionado, sino por el tiempo de uso disponible para los distintos movimientos de circulación. Un semáforo limita el tiempo disponible para los distintos movimientos en la intersección donde se sitúa. Es necesario tener en cuenta los problemas derivados de la interacción:

- *Seguridad*: minimizar los accidentes del sistema de gestión.
- *Medioambientales*: principalmente la contaminación. Por ejemplo, al estar el vehículo parado se produce un aumento de los niveles de emisión sin contraprestación.
- *Económicos*: pérdida del PIB cuando el vehículo está parado emitiendo gases.
- *Socio-personales*: aquellos que derivan y afectan a la vida privada de cada persona.

### 2.2.2. CONCEPTOS GENERALES

Estas serán las variables que se utilizarán y se medirán para caracterizar el tráfico por parte de las administraciones.

- **Volumen o intensidad.**

El volumen y la intensidad son dos medidas que cuantifican la cantidad de circulación que pasa por un punto o sección determinado de un carril o de una carretera durante un intervalo de tiempo concreto.

Esta variable es utilizada para cuantificar la demanda, esto es, el número de viajeros o conductores (normalmente expresado como número de vehículos) que desean usar una infraestructura dada durante un periodo específico.

El volumen es el número total de vehículos que pasan por un punto o sección transversal o por un tramo de un carril o carretera durante un intervalo de tiempo dado; los volúmenes pueden expresarse en términos anuales, diarios, horarios o períodos inferiores a una hora.

La intensidad de tráfico es el número de vehículos que pasan por una determinada sección de la vía o calle por unidad de tiempo en un intervalo

de tiempo inferior a 1 hora. Desde el punto de vista de la Ingeniería del Transporte distinguimos dos tipos de intensidad:

- *La intensidad media diaria (IMD)*: número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal determinada de la vía durante un año entre los días que tiene un año, 365.

$$IMD = \frac{\text{Número de vehículos/Año}}{365}$$

- *Intensidad máxima horaria (IMH) o intensidad punta*: número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal durante la hora que se considera representativa de las condiciones de mayor circulación.

En vías interurbanas para saber si hay un aforo alto medimos la intensidad media diaria, por tanto, que sea alto o bajo depende del aforo.

Para el correcto funcionamiento de una calle o una vía se tiene que evaluar su capacidad para la intensidad máxima horaria.

La consideración de las intensidades puntas es de una importancia crítica en los análisis de capacidad. Si en el estudio de una carretera durante una hora tenemos un volumen de 4300 vehículos y una intensidad punta de 4800 vehículos/hora (medida en un tiempo de 15 minutos), en el supuesto de que la capacidad de la carretera fuera de 4500 vehículos/hora, esta se colapsaría durante el periodo horario punta de 15 minutos aunque el volumen es inferior a la capacidad en la hora completa. Esta situación hay que tenerla muy en cuenta, porque la dinámica de disipación de un colapso puede extender los efectos de la congestión durante varias horas después de que ocurra el colapso.

Las intensidades punta se relacionan con los volúmenes horarios a través de la utilización del **factor de hora punta**. Este factor se define como la relación entre el volumen total horario y la intensidad punta en la hora:

$$PHF = \frac{\text{Volumen horario}}{\text{Intensidad punta (dentro de la hora)}}$$

- **Velocidad.**

Mientras que los volúmenes de tráfico proporcionan un método para cuantificar valores de capacidad, la velocidad es una medida importante de la calidad del servicio proporcionado al usuario. Se utiliza como una medida de eficacia importante que define los niveles de servicio en muchos tipos de vía, como son las carreteras de dos carriles, las carreteras arteriales, los tramos de trenzado de autopista, y otras.

La velocidad se define como la tasa de movimiento expresada como distancia por unidad de tiempo, generalmente como kilómetros a la hora (km/h). Se debe utilizar algún valor representativo para caracterizar la velocidad de una corriente de tráfico, porque generalmente se puede observar una amplia distribución de velocidades individuales dentro de dicha corriente. Así se define la velocidad media de recorrido, que se computa tomando la longitud de la carretera o tramo de calle o segmento considerado y dividiéndolo entre el tiempo medio de recorrido de los vehículos que atraviesan dicho segmento. Por tanto, se toman los tiempos de recorrido de  $n$  vehículos que atraviesan un segmento de longitud  $L$ , la velocidad media de recorrido sería:

$$V = \frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n}} = \frac{nL}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

donde  $t_i$  = tiempo de recorrido del  $i$ -ésimo vehículo que cruza la sección.

Los tiempos de recorrido utilizados en este cálculo incluyen las demoras en paradas debidas a interrupciones fijas o a la congestión de la circulación. Son tiempos de recorrido totales para recorrer la longitud de la carretera dada.

Se pueden aplicar varios parámetros de velocidad diferentes a una corriente de circulación:

- *Velocidad media temporal*: es la media aritmética de la velocidad de todos los vehículos que pasan por un punto fijo de la carretera. Se registra la velocidad de cada uno de los vehículos al pasar por un punto fijo, y se calcula la media aritmética. No suele corresponder con la velocidad real de circulación.

$$V = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n v_i$$

- *Velocidad media espacial*: es un término estadístico utilizado frecuentemente para denotar una velocidad media basada en el tiempo medio de recorrido de los vehículos en atravesar un segmento de carretera. Se denomina “espacial” porque al utilizar el tiempo medio de recorrido se pondera la media esencialmente en función de la cantidad de tiempo que cada vehículo permanece sobre el segmento definido de la carretera o “espacio”. Es más útil que la anterior y se calcula mediante radares en tramos mucho más significativos.

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

donde  $s_i$  es el espacio recorrido por los vehículos y  $m_i$  es el tiempo del vehículo  $i$  en el eslabón.

- **Densidad.**

El concepto de densidad en la ingeniería de transporte hace referencia al número medio de vehículos por unidad de longitud en la vía en un momento dado, definiéndose como:

$$U = \frac{n}{L}$$



donde:

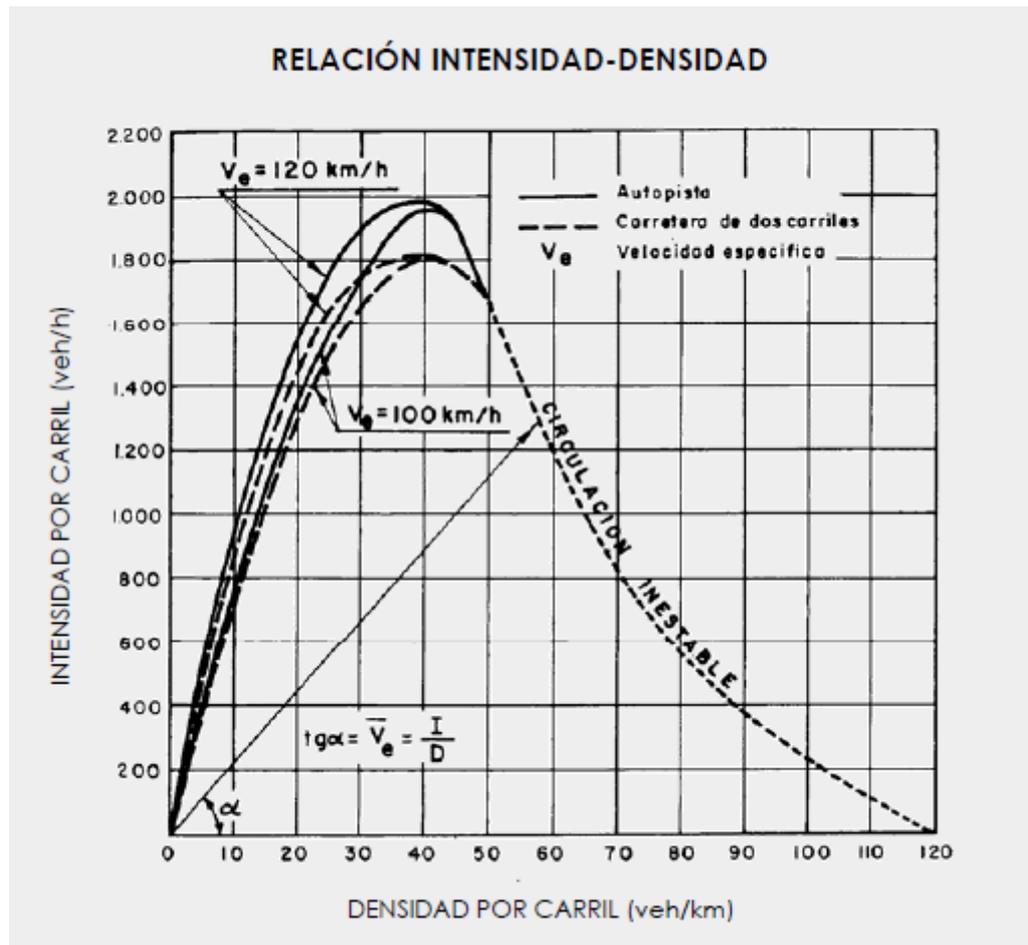
- $d$  = la densidad de vehículos en un instante de tiempo.
- $n$  = el número de vehículos en la carretera.
- $L$  = la longitud de la carretera.

### 2.2.3. RELACIÓN ENTRE INTENSIDAD Y DENSIDAD

Si representamos gráficamente esta función observaremos la existencia de un valor máximo de la intensidad, conocido como capacidad de la vía, llamándose la densidad para la que se obtiene dicho valor densidad crítica.

El régimen de circulación es totalmente distinto a ambos lados de esa línea marcada por la capacidad: mientras que para densidades menores que la crítica el funcionamiento de la vía es fluido y estable, existiendo facilidad para asimilar ciertas anomalías que puedan producirse, si la densidad supera la crítica se produce un empeoramiento drástico de las condiciones de circulación, produciéndose constantes detenciones e incluso en determinados momentos, acumulación de vehículos formando colas de difícil disolución.

Distintas estimaciones concluyen que el valor de la densidad crítica suele oscilar entre el 30 y el 40 % de la densidad máxima.



**Figura 2.1.** Relación intensidad-densidad (Balaguer).

*Fuente:* Manual de Carreteras, E., 2000, p. 162.

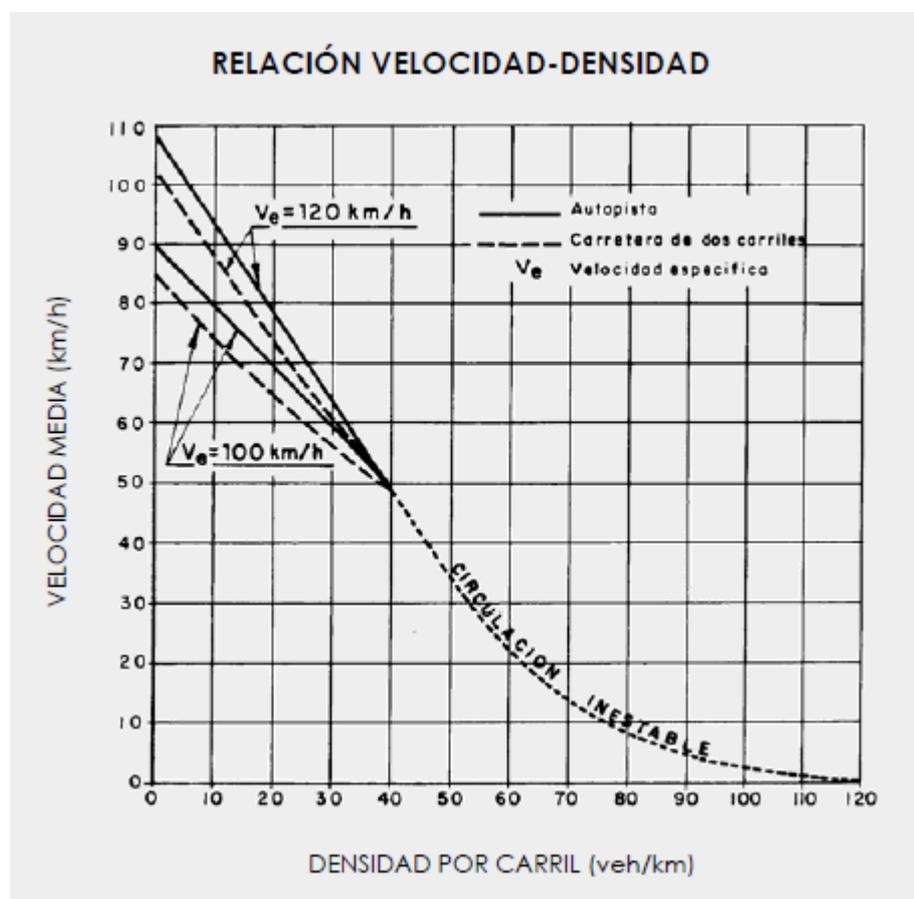
## 2.2.4. RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD Y DENSIDAD

De la representación de estas dos variables se extraen unas conclusiones que aunque son obvias y de sentido común, arrojan luz sobre el funcionamiento del tráfico.

Como puede observarse, la velocidad media y la densidad de vehículos están relacionados de manera lineal, de forma que a bajas densidades de tráfico los vehículos pueden circular a la velocidad que libremente escojan, coartada únicamente por las limitaciones mecánicas del vehículo y el trazado de la vía por la que circulan.

Por el contrario, a medida que aumenta la densidad de vehículos la velocidad de circulación va reduciéndose al encontrar cada vehículo más dificultades de movilidad, hasta llegar al extremo de que esta sea imposible, encontrándose entonces en condiciones de máxima densidad a la que corresponde una velocidad de circulación nula.

Entre ambos extremos se halla toda una gama de diferentes estados de circulación, cada uno correspondiente a un nivel de calidad de la vía. Cuando la densidad de circulación es crítica, se dice que la vía ha alcanzado su capacidad.



**Figura 2.2.** Relación velocidad-densidad (Balaguer).

**Fuente:** Manual de Carreteras, E., 2000, p. 163.

## 2.2.5. RELACIÓN ENTRE INTENSIDAD Y VELOCIDAD

De las tres relaciones, esta es sin duda la más sencilla de obtener en la práctica y aquella con la que se determinará el nivel de servicio o calidad que ofrece una determinada vía, dado que relaciona las dos magnitudes más fáciles de medir. Por ello, la gran mayoría de los estudios experimentales que se han realizado en carreteras y a partir de los cuales se extraen las principales conclusiones se basan en estas dos variables del tráfico.

La intensidad y la velocidad son variables directamente proporcionales, es decir, un aumento de la densidad corresponde una reducción de la velocidad media, hasta llegar a un punto de densidad crítica que corresponde a la máxima intensidad. Una vez llegados a este punto ambas decrecen. Este comportamiento se observa mejor en tramos completos que en secciones aisladas y cuantos más largos sean los tramos, los resultados son de mayor consistencia.

La velocidad media se deduce del conjunto de las velocidades de cada vehículo que son menos dispersas a medida que la densidad es más alta.

La velocidad depende también de otros factores, independientes de la intensidad, y que son función, unas veces de la vía, características geométricas y control de sus accesos y otras de agentes externos, como las condiciones atmosféricas.

La relación intensidad-velocidad media en condiciones de circulación continua o ininterrumpida puede representarse por una curva del tipo de las que se recogen en la figura 2.1.

En condiciones de circulación interrumpida o discontinua -que son normales por ejemplo en vías urbanas con semáforos- es difícil establecer la relación intensidad-velocidad.

La velocidad está condicionada por factores muy distintos: límites de velocidad, progresión de los semáforos o capacidad de intersecciones próximas. Los resultados obtenidos son poco consistentes.

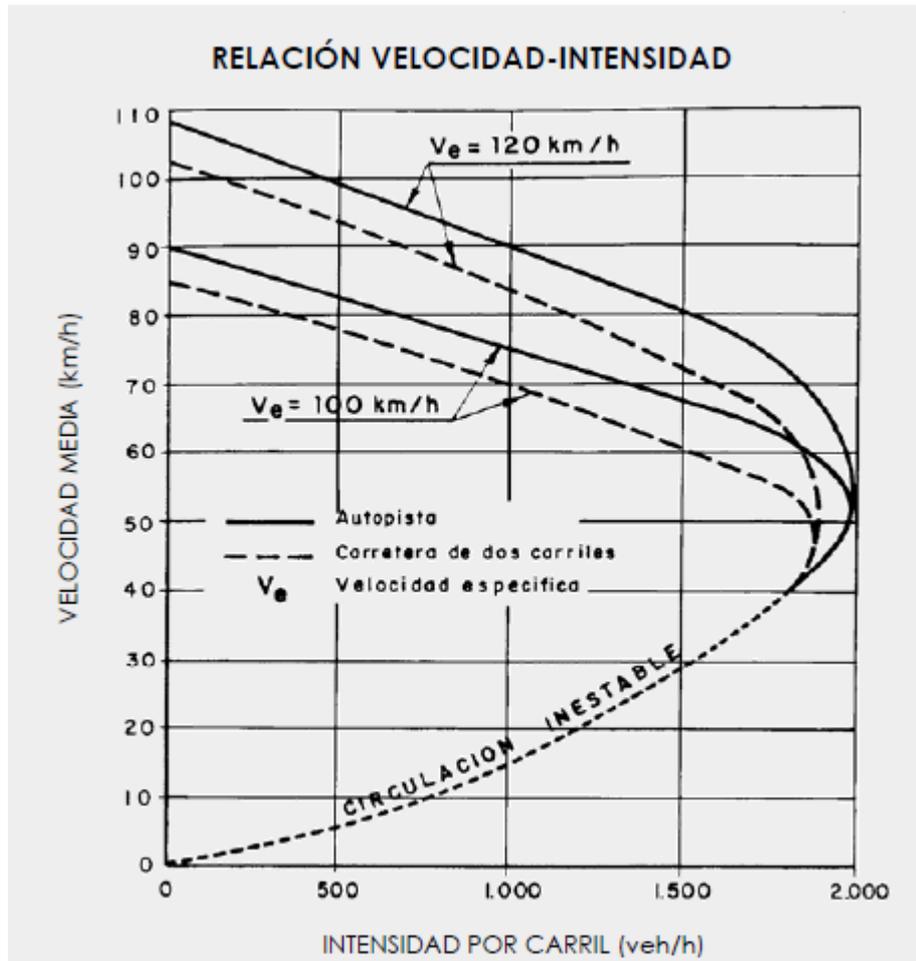


Figura 2.3. Relación velocidad-intensidad (Balaguer).

Fuente: Manual de Carreteras, E., 2000, p. 164.

## 2.2.6. RELACIÓN ENTRE LAS COMPONENTES DEL TRÁFICO

Existe una ecuación que relaciona los tres conceptos más importantes desde el punto de vista de la Ingeniería de Tráfico, la intensidad, la velocidad y la densidad. Esta es conocida como la **relación fundamental del tráfico**.

Así, cuando se proyecta una nueva carretera o se estudia el acondicionamiento de una existente, en la que se ha determinado la intensidad de tráfico que circulará por ella, se podrá estimar la velocidad de los vehículos correspondiente a esta intensidad a partir de la relación velocidad, intensidad, determinada en una carretera de características análogas.

Mediante una serie de procesos matemáticos se obtiene la relación fundamental:

$$i = d \times \bar{V}_m$$

donde:

- $i$ : intensidad.
- $d$ : densidad.
- $\bar{V}_m$ : velocidad.

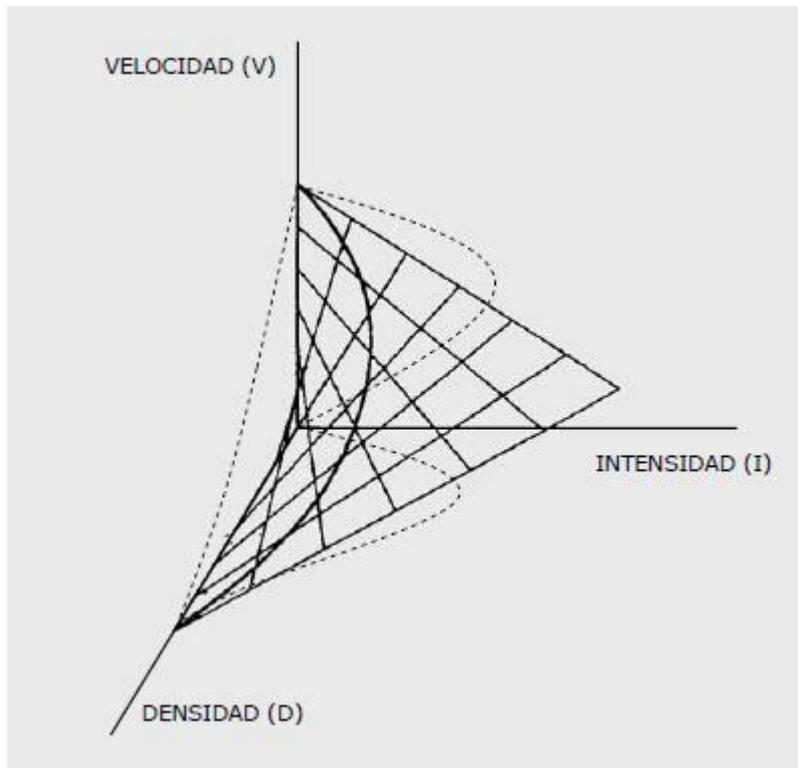
Esta relación liga las tres magnitudes fundamentales y permite calcular una de ellas, generalmente la densidad, en función de las otras dos.

Una carretera tiene una capacidad determinada. Dicha capacidad se alcanza con unas condiciones determinadas. Fuera de estas condiciones, la carretera permite un tráfico menor que su capacidad.

Si la densidad es baja y la velocidad  $\bar{V}_m$  alta  $\Rightarrow d \times \bar{V}_m$  puede ser pequeño, lo que implica que la intensidad será baja, estamos en capacidad infrautilizada pero esto no es problema. El problema es que la densidad sea alta y la velocidad sea baja o incluso pueda llegar a valer cero, con lo que la intensidad también será nula. Aquí es donde reside el problema. Se verá que la velocidad constante es la que permite un mejor uso de la carretera.

La representación gráfica de esta función es compleja, al tratarse de una función donde una de las variables de halla en función de las otras dos, por lo que debe recurrirse a la tercera dimensión. De cara a su manejo, es más

práctico operar con representaciones bidimensionales correspondientes a sus proyecciones planas, agrupando las variables por parejas.



**Figura 2.4.** Relación fundamental del tráfico.

**Fuente:** Manual de Carreteras, E., 2000, p. 161.

### 2.3. CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO

De lo visto en el punto anterior, se puede afirmar que en efecto existen ciertas relaciones entre las diferentes variables que componen el tráfico. Asimismo, también es cierto que existe alguna posibilidad de análisis matemático, conocido por las investigaciones que en esta materia han realizado los ingenieros de tráfico norteamericanos, al ser el país que más problemas tiene en la circulación de vehículos. En base a estas investigaciones, se concluye que el estudio del tráfico debe hacerse atendiendo a dos componentes: la **capacidad** y el **nivel de servicio**.



### 2.3.1. CAPACIDAD

Se define capacidad teórica de una sección de carretera como el número de vehículos que pueden estar o atravesar la vía durante un determinado periodo de tiempo –normalmente una hora- para unas condiciones particulares de la vía y del tráfico. Dicho de otra forma, es la máxima intensidad capaz de albergar una vía sin colapsarse.

Basándose en el empleo de curvas de distribución de probabilidad, se han desarrollado mecanismos para determinar la capacidad real de una vía en relación con el concepto de capacidad teórica.

Dada la capacidad teórica de una vía existen características propias de esta que limitan el tiempo que emplean los vehículos en recorrer el trayecto, como son: clima, tonelaje, potencia, paradas y habilidad del operario del vehículo, limitaciones que determinan la existencia de un tiempo mínimo para recorrer la ruta.

Establecida la capacidad teórica de la vía en vehículos-hora podemos obtener un número teórico máximo de vehículos que pueden circular. Este valor no es adaptable al estudio real debido a que el tiempo de interferencia promedia para un conjunto de condiciones es proporcional al número de vehículos que operan en un tiempo dado.

La General Electric Company desarrolló los diagramas de avance horario que permiten obtener el número de vehículos máximo reales capaces de circular de modo que no se rebase la capacidad teórica de la vía. Es decir que la capacidad real utilizada sea menor que la capacidad teórica calculada. Dicha capacidad se obtiene de integrar la función de probabilidad de los diagramas de avance horario.

El empleo de estas curvas de probabilidad demuestra que a medida que nos acercamos a la capacidad máxima de una vía, la interferencia entre los



vehículos crea demoras y hace aumentar los tiempos mínimos y promedios del viaje.

La capacidad de las carreteras se puede expresar mediante diferentes fórmulas matemáticas, estas expresiones matemáticas se encuentran restringidas por la “*distancia segura*” que el conductor adopta en su conducción, a su vez la capacidad de una carretera varía con la velocidad y la separación, el conductor tiende a aumentar la separación con la velocidad, aparecen pues los conceptos de separación y velocidad óptima que permita que un número máximo de vehículos pase por un punto en una hora.

Los estudios realizados estipulan que dicha capacidad teórica máxima se encuentra para un flujo de 2000 veh/h a 50 km/h, por otro lado la máxima densidad se produce cuando hay tantos vehículos que el movimiento cesa por completo. Cuando la densidad aumenta de modo que no es posible rebasar, el tráfico se mueve aproximadamente a la misma velocidad y la relativa entre vehículos se hace cero, este momento es la densidad crítica u óptima y cualquier aumento da lugar a una reducción en la velocidad y volumen del tráfico.

Las condiciones ideales para el flujo máximo no interrumpido son carriles de 3.66 m, 1.83 m de ancho libre entre acotaciones laterales, nada de vehículos comerciales, y visibilidad ilimitada.

Las interferencias pueden ser: de cruce marginal, intermedio, dirección contraria de un vehículo, etc. A continuación podemos ver una gráfica que representa la capacidad máxima de un carril en diferentes situaciones.

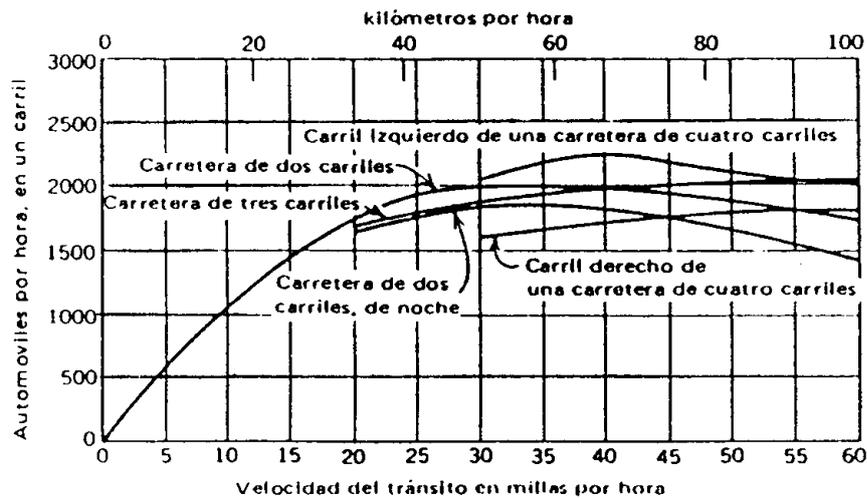


Figura 2.5. Capacidad máxima de un carril.

Fuente: Apuntes Ingeniería de Transporte.

### 2.3.2. NIVEL DE SERVICIO

El nivel de servicio, en Ingeniería de Tráfico, es una medida de la calidad que la vía ofrece al usuario.

El nivel de servicio, en principio, tendría que tener en cuenta un conjunto de factores que concurren en una vía cuando soporta una determinada intensidad de tráfico:

- *Velocidad y tiempo de recorrido*: tanto instantánea como para recorrer un tramo.
- *Interrupciones*: número de paradas por kilómetro y su duración, así como la magnitud y frecuencia de los bruscos cambios de velocidad necesarios para mantenerse en la corriente de tráfico.
- *Libertad de maniobra* para mantener la velocidad deseada.
- *Comodidad* en la conducción.
- *Economía*: coste económico directo de recorrer un tramo.
- *Accesibilidad*: facilidad para acceder a una determinada ruta.



- *Frecuencia del servicio*: importante en el transporte comercial de pasajeros.

Pero como es muy difícil valorar todos estos factores tan heterogéneos, el Manual de Capacidad de Carreteras (1995) recomienda identificar el nivel de servicio en función de la velocidad o tiempo empleado en recorrer un tramo, y añadir un segundo índice: la relación entre la intensidad de servicio o la intensidad de tráfico prevista y la capacidad, (índice de servicio o relación  $i/c$ ). En la práctica el conjunto de estos dos índices permite identificar el nivel de servicio de cada tramo.

Para obtener estos índices es conveniente seguir los siguientes criterios:

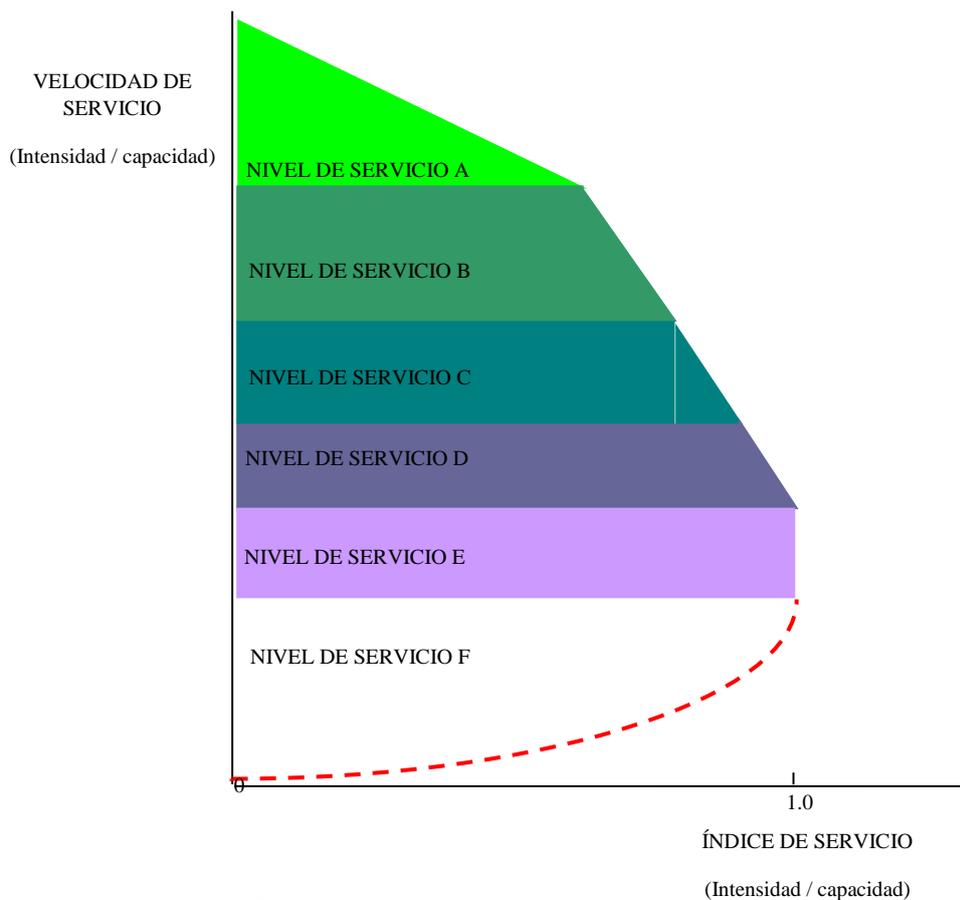
1. La intensidad y la capacidad se miden en vehículos por hora para cada uno de los sub-tramos en los que es convenientes dividir el tramo.
2. Los niveles de servicio deben establecerse para tramos de cierta longitud aunque varíe en ellos la capacidad por cambios físicos de la vía o el tráfico, por entradas y salidas. La clasificación del nivel de servicio del tramo debe tener en cuenta las diversas circunstancias de cada sub-tramo.
3. Conviene analizar la velocidad o el tiempo de recorrido y la intensidad en sub-tramos relativamente uniformes. La media ponderada de todos ellos define el nivel de servicio del tramo total.
4. Para definir los niveles de servicio se establecen separadamente valores de la velocidad y de los índices  $i/c$  para los siguientes tipos de vías:
  - Autopistas y autovías.
  - Carreteras de cuatro o más carriles.
  - Carreteras de dos o tres carriles.
  - Grandes arterias urbanas.

- Calles céntricas.

Se establecen seis **niveles de servicio** que comprenden todas las situaciones de tráfico que se pueden producir:

Los niveles de A a D se definen en función de unos límites determinados para la velocidad de servicio y de los índices de servicio  $i/c$ . El nivel E corresponde a situaciones próximas a la saturación y el F cuando se rebasa la capacidad de la vía, las condiciones son inestables y la velocidad e intensidad pueden variar considerablemente.

Veamos a continuación la figura 2.3 con la relación entre los diferentes niveles de servicio y otras variables.



**Figura 2.6.** Niveles de servicio.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 2.3.3. CAPACIDAD EN INTERSECCIONES CON SEMÁFOROS

Una de las razones fundamentales de interrupción del flujo de tráfico son las intersecciones, principalmente si están reguladas por semáforos. Las intersecciones que no están reguladas por semáforos mantienen un flujo sin interrumpir en la vía principal por medio de señales de stop en la vía secundaria.

Se establecen seis niveles de servicio en las intersecciones reguladas por semáforo, identificados por las letras A, B, C, D, E y F.

<b>A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operaciones con muy poca demora (&lt;5 s.)</li> <li>• El avance de vehículos es extremadamente favorable, sin apenas detenerse</li> <li>• La mayoría de los vehículos llegan a la intersección en la fase verde</li> </ul>	
<b>B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operaciones con ligera demora (5-15 s.)</li> <li>• El avance de vehículos es favorable, produciéndose detenciones esporádicas</li> <li>• Se da en intersecciones con buena progresión y ciclos semafóricos cortos</li> </ul>	
<b>C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La demora es considerable (15 a 25 s.)</li> <li>• La progresión de los vehículos es de mediana calidad y el ciclo es más largo</li> <li>• Detención de un número significativo de vehículos</li> </ul>	
<b>D</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La demora es elevada, entre 25 y 40 s.</li> <li>• Notable influencia de la congestión, con progresiones desfavorables y ciclos largos</li> <li>• Muchos vehículos se detienen</li> <li>• Falta de capacidad en ciclos individuales</li> </ul>	
<b>E</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operaciones con gran demora (40-60 s)</li> <li>• Avance lento de los vehículos y largas duraciones del ciclo</li> <li>• Alto grado de congestión</li> <li>• Frecuente falta de capacidad en ciclos individuales</li> </ul>	
<b>F</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La demora supera el minuto por vehículo</li> <li>• Nivel inaceptable por los conductores</li> <li>• Sobresaturación: la intensidad de llegada supera la capacidad de la intersección</li> <li>• Progresión deficiente, ciclos prolongados</li> </ul>	

**Tabla 2.1.** Niveles de servicio en vías urbanas.

**Fuente:** Manual de Carreteras, E., 2000, p. 211.



Existen unos **factores** que influyen en el **nivel de servicio y la capacidad de las intersecciones** reguladas por semáforos:

a) Condiciones físicas y de operación: anchura del acceso, distancia de bordillo a bordillo y anchura de los carriles, si la operación es de uno o dos sentidos y si se permite el estacionamiento en las proximidades de la intersección.

b) Condiciones ambientales: *factor de carga* y *factor de hora de máxima demanda*. El factor de carga representa el grado en que la luz verde se utiliza mientras dura, es la relación entre el número de fases verdes que están totalmente utilizadas y el número de fases verdes que hay en ese mismo periodo. Varía de 0,0 (siempre que hay luz verde da tiempo a que salgan todos los vehículos que esperaban antes de volverse a cerrar el semáforo) y 1,0 (nunca da tiempo a que salgan todos los vehículos y siempre hay alguno que tiene que esperar más de un ciclo de semáforo). El factor de hora de máxima demanda mide la consistencia de la demanda, se define como la relación entre el número de vehículos contados durante la hora de máxima demanda y cuatro veces los contados durante los quince minutos consecutivos de mayor intensidad. Para intersecciones con cargas muy elevadas durante casi una hora se utilizan factores de 0,85 y para intersecciones con flujos elevados durante períodos cortos se suelen usar factores de 0,6-0,7.

c) Características del tránsito: porcentaje de vehículos que realizan giros (sobre todo a la izquierda), porcentaje de camiones y autobuses (aceleran más despacio que los turismos), autobuses urbanos con paradas en alguno de los accesos a la intersección (las paradas en el acceso de salida entorpecen menos que en el de entrada siempre que no haya muchos giros a la derecha).

d) Medidas de control: señales de tráfico, dónde están colocadas (su visibilidad), duración del ciclo de semáforo y relación entre el tiempo de luz verde y el del resto del ciclo, las marcas en el carril de acceso (que determinan su anchura), pasos de peatones, etc.



### 2.3.4. CALIDAD DE SERVICIO

Como ya hemos dicho, nivel de servicio indica la cantidad de transporte necesaria para satisfacer la demanda. La **calidad de servicio** refleja la manera en que ese servicio se encuentra disponible atendiendo a aspectos tales como:

- Seguridad y confiabilidad.
- Flexibilidad (volumen, mercancía y ruta).
- Rapidez.
- Tiempo de viaje puerta a puerta.
- Economía de energía.
- Efectos en la comunidad y medio ambiente.

## 2.4. CONTROL DEL TRÁFICO RODADO

La función de control persigue 3 objetivos principales:

- Lograr la máxima seguridad.
- Usar de forma eficiente la red.
- Confiabilidad del movimiento.

El control puede ser algo sencillo o sumamente complejo. Más que un vehículo sea operativo en el sistema de transporte, es necesario asegurar que la colisión no ocurra, o al menos que la probabilidad sea baja, sin embargo se presenta la necesidad de mover los vehículos tan rápidamente como sea posible con las demoras mínimas. En definitiva, se trata de conseguir una intensidad de circulación máxima, pero esta intensidad es función de la velocidad, como viene reflejado en la ecuación fundamental, por tanto la solución de nuestro problema será obtener la velocidad óptima de circulación.

Estos objetivos a veces entran en conflicto. Por ejemplo, los vehículos no pueden circular a gran velocidad y con seguridad si se encuentran demasiado próximos. Además de la seguridad, confiabilidad, y rapidez está el



objetivo de aprovechar al máximo la capacidad de tránsito. Para ello tendremos en cuenta la velocidad máxima permitida y el horario.

Aunque los medios específicos para efectuar el control de vehículos varían considerablemente entre las tecnologías de transporte, el proceso básico lo podemos resumir en cuatro etapas:

- 1.-Situación que requiera cambio en el movimiento del vehículo.
- 2.-Detección de esa condición.
- 3.-Variación de las fuerzas sobre el vehículo.
- 4.-Cambio de la velocidad, dirección,... del vehículo.

El control incluye llevar registros del movimiento de todos los vehículos, también implica proporcionar información para fines operacionales.

Uno de los problemas principales consiste en determinar que parte del control debe ser automático y que parte se debe dejar al operador. En algunos sistemas el operador puede desempeñar únicamente funciones de vigilancia, combinadas a veces con la posibilidad de anular los controles automáticos en caso de emergencia o cambio de planes.

Los problemas relativos se derivan de la creciente complejidad de los aparatos de control, las velocidades sónicas y supersónicas de algunos transportes y las cada vez mayores densidades de tránsito en medios de densidad limitada, frente al tiempo de reacción y la capacidad de la mente y el cuerpo humano para comprender y tomar decisiones.

La meta es habilitar la detección de cualquier condición que pueda requerir un cambio ya sea en el movimiento, en la velocidad, dirección, altitud, etc., en un tiempo y distancia suficiente para evitar el peligro. Esto supone los cuatro pasos mostrados en el proceso anterior.



Hay muchos tipos diferentes de situaciones que pueden requerir un cambio en el movimiento del vehículo -uno por supuesto es un cambio en la dirección de la vía tal como una curva- que se puedan negociar con seguridad sólo a velocidades reducidas.

Este tipo de situación es fácilmente controlable porque la presencia del peligro potencial es conocida de antemano y se pueden anunciar señales de advertencia apropiadas al conductor.

Las situaciones temporales son más difíciles de tratar, por ejemplo, personas cruzando una calle, otros vehículos en la carretera, cruce de vehículos. Aunque diferentes tecnologías de transporte y asignación de rutas diferentes son sometidas a diferentes variaciones para estas situaciones imprevistas, todos los movimientos de los vehículos deben ser controlados de manera que tengan en cuenta la posibilidad de imprevistos.

### **2.4.1. CANALIZACIÓN**

Es probablemente la forma más común de control del movimiento de vehículos. La idea básica es la de segregar el movimiento de vehículos en categorías, tal que el movimiento de todos estos vehículos en una categoría sea lo más homogénea posible. Se ha observado que la mediana en las autopistas ha reducido probablemente los accidentes de tráfico más que ninguna otra invención de control de tráfico. La canalización es usada en todas las tecnologías de transporte.

### **2.4.2. COMUNICACIONES**

Los primitivos sistemas de operación se apoyan en el hábito, las reglas, las señales, los banderines. El control de operaciones moderno no puede existir sin un sistema de comunicaciones adecuado. El telégrafo y más tarde el



teléfono, eran suficientes para el transporte de otros tiempos; pero las operaciones actuales requieren extensos sistemas de telefonía, radio, teletipo,... que aumentan su efectividad.

Hoy en día, en el transporte por carretera, los estudios van encaminados a sistemas que proporcionan una información detallada al usuario para proporcionar una mayor fluidez y aprovechamiento de las vías. Se trata de sistemas expertos que analizan el flujo de tráfico en tiempo real con lo que el conductor dispone de una información actualizada del estado de la vía. Ejemplo de esto, es el aumento en la utilización de dispositivos de GPS en los vehículos.

Las comunicaciones se emplean principalmente para despachar, es decir, para dirigir y seguir el rastro de los movimientos de los vehículos; ejemplo de ello son los taxis, los vehículos de servicio, las flotillas industriales y los vehículos de carga motorizadas.

De esta forma se mantiene el contacto por radio con cada vehículo, anotando los movimientos en un registro y dirigiéndolos hacia tareas sucesivas, consiguiendo así una efectividad mucho mayor.

### **2.4.3. LÍMITES DE VELOCIDAD**

A menudo hay necesidad de limitar la velocidad de los vehículos en lugares específicos.

Para los sistemas de ferrocarril y carretera, esta limitación la mayoría de las veces se debe a la presencia de curvas o pendientes en la ruta, cercanías de muelles y áreas recreativas, las cuales podrían ser inseguras a elevadas velocidades. Tales restricciones de velocidad están indicadas por señales a lo largo de la ruta, con una antelación suficiente, para advertir la restricción y que el vehículo tenga tiempo de disminuir su velocidad. Igualmente signos de precaución indican la probabilidad mayor de encontrarnos con condiciones de peligro.



El control del movimiento de vehículos y el control de la velocidad son aplicados para asegurar que un vehículo no colisione con otro viajado en la misma vía. En cruces esto es un problema importante de seguridad. El segundo vehículo debe mantener una distancia de seguridad y una velocidad tal, que pueda parar, o desviarse en el tiempo necesario para evitar al primero. Así el término **control de seguimiento** es aplicado para cubrir esta situación.

Y utilizamos el término **seguimiento de comportamiento** en caso donde la conducta humana es un elemento para el control del vehículo y proceso de decisión. Aquí el conductor de cada vehículo es responsable de que su vehículo no colisione con otros objetos y por lo tanto él debe tener en cuenta la posición y velocidad del vehículo que le precede. Por supuesto hay reglas de tráfico pero que no siempre son obedecidas.

## 2.5. ESTUDIO Y PLANIFICACIÓN DEL TRÁFICO RODADO

### 2.5.1. ESTUDIO DEL TRANSPORTE: AFOROS

Está claro que a la hora de realizar cualquier estudio de tráfico uno de los primeros pasos es la evaluación de los movimientos que se originan, para ello hay que medir el número de vehículos que pasan por un determinado carril en un intervalo de tiempo.

Las características que son objeto de un estudio de aforo son:

- Intensidad de circulación.
- Velocidades y tiempos de recorrido de los vehículos.
- Origen, destino y objeto de los viajes realizados.
- Accidentes de circulación.



### 2.5.1.1. OBJETIVOS DE LOS AFOROS

- 1) Comparación, sobre bases objetivas, entre unas vías y otras, a los efectos de cualquier programa de actuación.
- 2) Justificación de las inversiones en las que el tráfico es una variable.
- 3) Determinación de las características físicas de las vías, especialmente en los cruces, de acuerdo con las necesidades del tráfico.
- 4) Establecimiento de señalización fija o automática.
- 5) Asignación de tráfico a nuevas vías.
- 6) Elemento de investigación.

De los datos de aforos en una vía ya sea calle o carretera, se pueden obtener muchas de las variables relacionadas con el tráfico que se han comentado y explicado anteriormente como son: IMD (intensidad media diaria anual), las intensidades horarias, la composición del tráfico, la distribución por sentidos, los movimientos de giro y la intensidad de tráfico de peatones.

### 2.5.1.2. TÉCNICAS DE AFORO

Los aforos pueden realizarse tanto manualmente como automáticamente. La utilización de un método u otro viene condicionada por dos aspectos fundamentales como son los medios disponibles y los resultados que se pretenden obtener.

Los aforos automáticos no son útiles en ciertas situaciones:

- Para estudiar los movimientos de giro.
- Para estudiar la composición del tráfico.
- Si las condiciones físicas de la vía impiden la instalación de contadores automáticos.

Los aforos manuales se realizan con dificultad si:



- Las intensidades horarias son muy elevadas.
- Se requiere un conocimiento continuo de la intensidad.

- **Aforos manuales.**

Este tipo de aforos consisten en que un observador anota el paso de cada vehículo rellenando un impreso especial o sobre unos contadores manuales montados sobre bandejas especiales, cada vez que un vehículo realiza el movimiento elemental que se está aforando o estudiando.

Las características principales de estos aforos son que suministran una información más completa durante periodos cortos de tiempo, requieren de un elevado personal adecuadamente preparado y si se pretende mantener la información permanentemente, son costosos y difíciles de llevar a cabo.

Cuando la intensidad horaria es elevada, o bien si se requiere información simultánea de muchos movimientos o de muchos tipos de vehículos, son necesarios varios observadores.

Es aconsejable no pasar de los 800 vehículos/hora por observador si es preciso clasificar los vehículos. A veces se realizan en periodos muy cortos - inferiores a 15 minutos- de este modo un mismo observador puede en una hora recoger datos de varios movimientos diferentes.

DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS Y CAMINOS VECINALES		AFORO DE CARRETERAS				ESTACION					
ESTADO DEL TIEMPO		DIA DE LA SEMANA		FESTIVO o VOFESA DE FESTIVO		Dia		Mes		Año	
AFORO N.º		HOJA N.º /									
DATOS:											
COMPONENTES		DE A									
	CARROS	A									
	BICICLETAS	B									
I MOTOS	MOTOS	1									
II VEHICULOS LIGEROS	COCHES	2									
	CAMIONETAS (4 RUEDAS)	3									
	TRACTORES AGRICOLAS	4									
III VEHICULOS PESADOS	CAMIONES SIN REMOLQUE	5									
	CAMIONES CON REMOLQUE VEHICULOS ESPECIALES	6									
	AUTOBUSES	7									

DATOS TOMADOS POR .....

Tabla 2.2. Impreso del MOPT para la realización de aforos manuales.

Fuente: Manual de Carreteras, E., 2000, p. 167.

- Aforos automáticos.

Como mencionamos con anterioridad, estos aforos automáticos no son útiles para estudiar movimientos de giro o la composición del tráfico, pero son muy útiles cuando la intensidad horaria del tráfico es muy elevada.



Los equipos empleados para realizar estos aforos son:

a) Contadores automáticos: utilizados hasta hace pocos años y que consistían en que el vehículo al pisar un tubo de goma extendido sobre la calzada transmitían un impulso que cerraba un circuito eléctrico (neumáticos).

b) Totalizadores: con sistema análogo al anterior, solo que van acumulando todos los impulsos que reciben.

c) Registradores: también funcionan con un sistema similar solo que sobre una cinta se imprime el número de vehículos que pasan en un cierto tiempo, para ello va provisto de un sistema de relojería. Son los más utilizados pero también son los más caros. Algunos registran gráficamente el paso de vehículos.

d) Otros sensores más complejos que se han extendido últimamente son los de presión, electromagnéticos, electrónicos o los fotoeléctricos.

El objetivo fundamental es contar el número de vehículos que pasa por la calzada, pero son utilizados cuando el objetivo no es sólo el aforo sino también para el control electrónico de un cruce, semáforo,...

### **2.5.1.3. AFOROS EN ZONAS URBANAS**

Como es razonable pensar, el tráfico presenta unas características muy distintas en las vías urbanas y suburbanas que en las carreteras situadas en pleno campo. Los ciclos anual y diario son más uniformes, la saturación es más frecuente, las intersecciones están más próximas y la distribución por sentidos es casi siempre más equilibrada.

Además los objetivos de los aforos son distintos. En las ciudades interesa más la intensidad en la hora punta que la IMD, y son más frecuentes los aforos encaminados al estudio de una solución determinada.



La uniformidad característica de los ciclos de tráfico urbano permiten simplificar los planes de aforos pudiéndose reducir a estaciones de cobertura aforados durante 24 ó 48 horas y a muy pocas estaciones de control o permanentes, e incluso se puede prescindir de los sábados, domingos y festivos, pues en estos días la intensidad es normalmente inferior.

El Plan de Aforos en una zona urbana consta de las siguientes etapas:

1.- Definición del sistema viario que constituye la red a aforar. En años sucesivos se completa el plan inicial.

2.- Establecimiento de al menos una estación permanente para definir las variaciones del tráfico, y en ciudades importantes, al menos cuatro estaciones permanentes o de control para definir los ciclos en: centro de ciudad, vías de penetración al centro, vías tangenciales al centro y zonas periféricas.

3.- Realización de programas de aforos de cobertura, con una duración de 24 ó 48 horas, que cubra el conjunto de la red a estudiar. Es suficiente con la ubicación de este tipo de estaciones en los tramos de la calle comprendidos entre intersecciones de importancia; aun así es necesaria una estación de aforo cada 2 a 4 km de calles.

En ocasiones debido a la dificultad que representa seguir el movimiento de cada vehículo, complejidad de movimientos y elevadas intensidades de tráfico, no es fácil conseguir la información, aunque se disponga de los medios, aparatos y operarios necesarios.

Hay movimientos que son prácticamente imposibles de medir mediante la utilización de aforos simples, es preciso obtenerlos a través de otros aforos. En casos muy complicados pueden emplearse procedimientos más complejos como son las encuestas. Uno de estos procedimientos consiste en la toma de matrícula de los vehículos que entran y salen de la intersección.



Hasta 500 vehículos/hora pueden ser registrados por dos operarios, si hay de 500 a 1.000 se utilizan cintas magnetofónicas y si supera los 1.000 veh/hora la toma de datos es prácticamente imposible. El proceso de toma de datos resulta complicado y se estima que son necesarias dos personas día por cada 1.000 vehículos. Si se realiza con ordenador se resuelve con un programa sencillo.

En intersecciones complicadas pero sin gran intensidad de tráfico, se pueden realizar encuestas parando a los conductores en alguno de los accesos y realizando aforos en todos ellos. Está claro que este método no es válido para zonas céntricas con gran intensidad, por su difícil aplicación.

Las principales variables que intervienen a la hora de aforar una intersección son:

- Intensidad del tráfico.
- Composición.
- Número y disposición de los ramales.
- Espacio disponible y condiciones de observación para hacer los aforos.
- Distancia recorrida por los vehículos dentro de la intersección.

## **2.5.2. PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE**

La planificación del transporte tiene diferentes problemas y contiene diversos procedimientos que deberán variar con el nivel en que se lleve a cabo y el tipo de necesidad que se desea satisfacer. La planificación la efectúan diversos organismos a muchos niveles.

El objetivo principal es dar un servicio de transporte seguro, conveniente, rápido, y de puerta a puerta, en todo clima, y confiable desde el punto de vista del volumen y tipo de mercancías especificados, y todo ello a un coste razonable.

- *Metas generales:* satisfacer la necesidad reconocida. Determinar un nivel de servicio para satisfacer la demanda estimada.
- *Metas inherentes:* capacidad adecuada, rapidez, frecuencia de servicio y accesibilidad. Elegir una calidad de servicio apropiada.
- *Meta adicional:* asegurarse de que todos los usos propuestos del suelo y los núcleos humanos tengan accesibilidad humana.

Problemas que se presentan: definir las características de la demanda, selección de la modalidad, efectos en los valores, y medio ambiente.

Para la definición de la demanda, hay que determinar las fuentes generadoras de tráfico y cuantificar su potencial suministro de viajeros y carga; es preciso determinar la distribución del tráfico, las toneladas de carga, el número de viajeros y vehículos que se llevarán al punto de destino y las modalidades y rutas que se van a emplear para ese fin.

Para la selección de la modalidad, intervienen factores tecnológicos y de coste. La modalidad que se elige deberá ser la que ofrezca el grado máximo de utilidad, es decir, la que más convenga a la tarea que se trate; la que sea capaz de proporcionar un servicio del nivel y calidad requeridos a un coste económico-social y ambiental aceptable. La demanda se relaciona con la calidad de servicio.

El grado de utilidad mide las posibilidades de una modalidad para dar servicio de acuerdo con los objetivos de la planificación. Es función de las características técnico-económicas de la modalidad.

Utilidad frente a tecnología, observar, relacionando con el coste, las siguientes características: resistencia a la propulsión, relación entre carga útil y peso muerto, fuerza de propulsión, eficiencia térmica, respuesta a pendientes, flexibilidad, seguridad, rapidez, capacidad, efectos en el medio ambiente, contaminación, confiabilidad, necesidades de energía...



Economía de combustible: el coste del combustible; es una de las partidas principales en los gastos de operación de los medios de transporte. La economía impone la necesidad de obtener el mayor número posible de kilómetros o millas por tonelada o galón de combustible.

Costes de construcción: el coste inicial de construcción, o sea, de capital, con frecuencia tiene importancia fundamental en la elección de la modalidad. Los costes pueden ser excesivamente altos para algunas modalidades.

### 2.5.2.1. ETAPAS DE LA PLANIFICACIÓN

La planificación y ejecución de los planes sigue por lo general un patrón de acuerdo con las siguientes etapas. Estas etapas son flexibles en relación con el proyecto concreto.

1.-Reconocimiento de la necesidad: La necesidad puede ser actual y grave o puede no ser evidente. Basta estudiar las necesidades presentes y futuras.

2.-Metas de la planificación: La planificación ha de tener una dirección y un propósito específicos; esto es, establecer objetivos que representen los valores comunales, así como los medios necesarios para lograr estos objetivos.

3.-Objetivos de la planificación: Representan la dirección en que una sociedad, (empresarial, urbana, regional o nacional), desea moverse. Los *objetivos* sirven para lograr las metas, los *criterios* se aplican para cuantificar los objetivos.

4.-Análisis de demanda: Los estudios de demanda son el fondo de información a partir del cual se puede proceder a la planificación. Las cargas de tránsito que ha de soportar el sistema son, en buena medida, función del uso del suelo y de la población.



5.-Proyecciones: Establecida la demanda, el tráfico se distribuye entre rutas y modalidades de transporte existentes. Se compara la capacidad actual con la demanda actual y se observa el exceso o falta de capacidad. Se efectúa ahora la *elección* de modalidades. La demanda del tránsito se proyecta al futuro; se asignan las rutas y se anotan nuevamente los excesos o las deficiencias de capacidad.

6.-Diseño de soluciones: Considerar todas las soluciones posibles y desarrollar con más detalle las dos o tres que resulten más prometedoras. *Selección* de modalidad, diseño y ubicación de la red. Nivel de servicio que se espera dar y el coste económico de cada alternativa. Se toma nota de las consecuencias sociales y medioambientales.

7.-Evaluación de alternativas: Se evalúan aquellas seleccionadas para su análisis detallado. Hay que considerar en la evaluación: utilidad o efectividad de las soluciones alternativas, calcular el coste económico de cada una, así como los costes sociales y ambientales y consecuencias significativas de cada solución alternativa. La aceptabilidad por parte del público es un criterio muy importante.

8.-Presentación: Los planes que se recomiendan y las alternativas viables se presentan al correspondiente Consejo de Planificación. El cuerpo de planificación rara vez toma las decisiones. Conviene incluir los métodos de financiación que se sugieren.

9.-Ejecución del plan: Una vez aprobado y autorizado el plan, establecer métodos de financiación que permitan preparar los planos y diseños finales, adquisición del terreno, presentación de presupuestos y la construcción, seguidos de la etapa final: la operación.

Existe interrelación entre todas las etapas y una coordinación muy estrecha. La planificación inicial puede indicar que el proyecto no se justifica o es impracticable, evitando en este caso un gasto innecesario de recursos y esfuerzos.



### 2.5.2.2. CONCEPTO DE COSTE

Por lo general el coste de proporcionar u obtener servicios de transporte determina la elección definitiva del tipo de transporte, salvo cuando prevalecen condiciones tecnológicas restrictivas.

El ingeniero de Organización se enfrenta constantemente al problema de elegir prácticas tecnológicas que den como resultado un coste mínimo.

El concepto de coste es muy amplio y abarca numerosos sectores que van a influir en la elección de la alternativa a seguir. A continuación se tratarán distintos tipos de coste y su importancia en la planificación del transporte.

- **Costes de capital y costes de operación.**

*Costes de capital:* lo que cuesta obtener la planta y el equipo iniciales, las ampliaciones y mejoras a esas instalaciones. Desglosamos estos costes en inversiones en ruta y estructura e inversiones en equipo.

Los costes de capital incluyen los intereses que se pagan por capital invertido.

- *Costes de operación:* los de manejo del negocio de transporte. Dividimos los costes de operación en:
  - *Mantenimiento de la ruta:* conservar carreteras, vías férreas, pavimentos, capas de apoyo, tuberías, puertos...
  - *Mantenimiento del equipo:* conservación del equipo motriz y rodante.
  - *Costes de transporte:* aquellos en los que se incurre al llevar a cabo el transporte; es decir, combustible y energía, sueldos de las tripulaciones, costes de terminal y sueldos de quienes dirigen el movimiento de vehículos.
- Costes de control de tránsito:
  - *Costes de tráfico:* son los de solicitud de carga, publicidad, publicación de tarifas y administración.



- *Costes generales y diversos*: gastos de oficina, de asesoría legal y contabilidad, sueldos de los funcionarios generales y su personal.

- **Costes fijos y variables.**

Todos los costes se pueden expresar de una de estas dos formas:

*Costes fijos*: son aquellos que tienen poca o ninguna relación con el volumen de tráfico e incluso se puede incurrir en ellos cuando no se mueve tráfico alguno. A los costes fijos se les llama también costes indirectos.

*Coste variable*: son aquellos que fluctúan con las variaciones del tránsito. A los costes variables también se les llama costes directos.

Los costes fijos y variables se relacionan con el tiempo.

- *Corto plazo*: período suficientemente corto, como para que la capacidad permanezca fija.
- *Largo plazo*: período suficientemente largo para que se produzcan cambios en la capacidad.

Si estamos a corto plazo, un aumento del volumen de negocio da lugar al aumento de los costes variables o directos, mientras que a largo plazo un aumento del volumen de negocio puede dar lugar a un aumento de los costes de capital fijos y variables. Es decir, los costes fijos aumentan con los costes de capital y mantenimiento de las nuevas instalaciones, y los costes directos totales pueden aumentar también.

- **Costes directos e indirectos.**

- *Costes directos*: provienen de y son atribuibles a una operación individual. Son los llamados costes en efectivo.
- *Costes indirectos*: son aquellos en que se incurre debido a la operación de la modalidad de transporte. Solo son asignables a



una operación individual, mediante un método de distribución contable más o menos arbitrario.

### 2.5.2.3. ENCUESTAS PARA EL ESTUDIO DE LA DEMANDA.

Utilizamos las encuestas para profundizar en el conocimiento real de la demanda del transporte, analizando sus características y objetivos, así como su relación con otros factores socioeconómicos.

El fundamento de las encuestas de transporte estriba en el hecho comprobado de que los viajes realizados por un determinado grupo de personas -en cuanto a su forma física y objetivos- se repiten con gran similitud día a día. Las encuestas tratan de identificar la forma en que durante un día típico, una muestra representativa de cierto grupo de personas realiza sus viajes cotidianos.

No se trata de conocer opiniones ni de realizar preguntas hipotéticas, sino de recoger, clasificar y analizar convenientemente hechos comprobados de cuya consideración objetiva se deducen los resultados de la encuesta.

- **Tipos de encuestas.**

Se diferencian según la forma de realizar la encuesta, tenemos:

- Encuestas que se realizan en la vía pública, deteniendo a todos o a una parte de los vehículos que utilizan una calle o carretera determinada. Generalmente están orientadas a obtener información de viajes de vehículos.
- Encuestas a domicilio, mediante entrevistas con una o varias personas que residen en una misma vivienda. Orientadas a obtener información de viajes de personas, cualquiera que sea el medio de transporte utilizado.

- Encuestas bajo formularios, por tarjetas o impresos entregadas directamente o por correspondencia, orientadas según en qué casos a viajes de vehículos o personas.
- Encuestas por entrevista con fines específicos, como son las realizadas para estudios de estacionamiento o para determinar índices de atracción de viajes hacia determinados centros de actividades.

Otra clasificación sería:

- Internas: estudian el tráfico dentro de los límites de un área urbana.
  - Externas: estudian la conexión de un núcleo con el entorno exterior, en general analizando el tráfico que cruza el anillo que lo rodea.
- **Encuestas origen-destino en la vía pública.**

El objeto fundamental es conocer el origen y destino de los viajes de los vehículos y algunas características de sus desplazamientos, tales como objetos, longitudes de los viajes y ocupación de los vehículos. Existen diferentes tipos:

Para estudiar el tráfico entre la ciudad y el exterior, así como el recorrido interno que hacen los viajes con un extremo fuera de la ciudad. Las estaciones de control se sitúan alrededor de la ciudad o área urbana.

Para conocer las características de los viajes que la cruzan, en muchas ocasiones como comprobación de los resultados obtenidos en una encuesta a domicilio. Se realiza estableciendo una pantalla a través de la zona en estudio.

Para estudiar los desplazamientos de vehículos que efectúan recorridos largos. Con estaciones de control que cubran extensas superficies.

Las encuestas pueden servir para estudiar puntos concretos, o cruces difíciles que no pueden abordarse con simples aforos, por efectuarse dentro de ellas movimientos complicados, difíciles de observar a simple vista.

- **Encuestas origen-destino a domicilio.**

La entrevista debe recoger toda la información correspondiente a los viajes realizados por cada miembro de la familia o residente en la vivienda mayor de 5 años de edad, en un día determinado, cualquiera que sea el medio de transporte utilizado.

Presentan las siguientes características:

- Es un sistema de información relativamente costoso, pero proporciona datos muy completos y fiables.
- La información es completa en cuanto a los viajes generados, es decir, aquellos en que uno de sus extremos coincide con el domicilio.
- También se puede tener información de los viajes no generados, pero necesito información complementaria: encuestas de aparcamiento, de pantalla o de grandes centros de atracción de viajes.
- Los viajes no generados en los domicilios tienen una importancia pequeña en el conjunto del área urbana -información generalmente cerca del 20%-. Aunque en las zonas céntricas puedan representar un porcentaje considerable de los desplazamientos totales.
- Es fundamental obtener de la encuesta datos que permitan relacionar la demanda del transporte con los factores socioeconómicos y de localización correspondientes al área urbana que se estudia.

Se trata en estas encuestas, de obtener correlaciones entre demanda de transporte y factores socioeconómicos en especial datos referentes al uso del suelo.

- **Otros tipos de encuestas.**

- Encuestas por tarjetas o correspondencia: Consiste en entregar directamente o enviar por correo unos cuestionarios referentes a las materias que interesa conocer, y que en general se refieren a los desplazamientos realizados durante un día.
- Encuestas a determinados tipos de vehículos

- *Vehículos comerciales*: los resultados más interesantes de estos estudios suelen ser los que relacionan los viajes con el uso del suelo en el destino, que permiten caracterizar los factores de atracción.
- *Taxis*: los resultados son interesantes por la gran presencia de estos vehículos en el centro de las grandes ciudades.
- Encuestas de estacionamiento: Presentan las siguientes características:
  - Pretenden conocer la situación que existe en un cierto momento y en una determinada zona en cuanto al estacionamiento.
  - Pueden estar orientadas:
    - A encontrar una solución a un problema concreto en una zona; se utilizarán estudios de inventario y estudios que determinan el uso del estacionamiento.
    - A obtener una información de base, para aplicarla a otro problema, actual o futuro, que tiene cierta analogía con el estacionamiento; se utilizarán muestreos, siendo más importante recoger aquellos datos que relacionan la demanda de estacionamiento con el uso del suelo, con el objeto de los viajes realizados por los vehículos estacionados y con la duración del propio estacionamiento.

## 2.6. TRÁFICO NO RODADO: MOVILIDAD URBANA

En una ciudad como Valladolid, de un tamaño medio y núcleo denso, el 50% de la movilidad es peatonal. Este transporte peatonal es lo más fácil en el centro porque las calles son estrechas.

Debido a que los peatones suponen un movimiento mayoritario se propone que tengan la importancia que requieren tanto en el espacio como en el tiempo.



La aparición de horas punta en el tráfico rodado aumenta el porcentaje de desplazamientos peatonales, así como la existencia de un centro con múltiples usos y servicios. Por otro lado una alta capacidad económica favorece la movilidad del tráfico rodado.

En zonas urbanas la mayoría de las calles son utilizadas conjuntamente por peatones y vehículos, lo que hace indispensable el estudio del binomio peatón-automóvil para poder proyectar infraestructuras acordes a ambos grupos.

### **2.6.1. ASPECTOS INICIALES.**

El movimiento de un vehículo suele ir asociado a un fin, mientras que la movilidad peatonal no puede tenerlo.

Existe la demanda de poder realizar esta actividad de manera placentera. Incluso en algunos casos existe una demanda de carácter deportivo.

Su hándicap es la falta de espacio y de continuidad en su trazado. La movilidad peatonal tiene como característica importante que el movimiento no está normalizado. Los peatones pueden hacer el movimiento que les interese. Esto se tendrá que tener en cuenta a la hora de diseñar el espacio para ofrecer a cada uno de los peatones espacio suficiente para realizar los movimientos adicionales que quiera.

Su movimiento no está canalizado y se evalúa mediante el cálculo de un Nivel de Servicio.

- Disponen de libertad de movimiento, de velocidad y de circulación agrupada.



A la hora de moverse, no todos los peatones quieren circular a la misma velocidad. Por ello, la velocidad no será uniforme y se tendrá que dar respuesta a todos.

- Su movimiento se produce por objetivos, placer o deporte.

## 2.6.2. ANÁLISIS DEL NIVEL DE SERVICIO.

Para calcular el nivel de servicio tenemos que definir las variables de partida. Es importante conocer qué criterios siguen los peatones para establecer este nivel de servicio. Estos son:

- Facilidad del movimiento.
- Percepción del entorno, una valoración personal del entorno en el que se mueven.

Las variables de valoración cuantitativa con las que vamos a caracterizar el sistema son:

- **Velocidad peatonal:** Es la velocidad de marcha peatonal media. Debido a los diferentes tipos de peatones será no uniforme. Por tanto se tendrá que tener en cuenta la velocidad media.
- **Intensidad:** Mide el número de peatones dividido entre la unidad de variación de este flujo. Se utiliza generalmente para un periodo de tiempo de quince minutos.  
Cuando se habla de intensidad debido a la variabilidad de anchura de los espacios peatonales, no sólo se hace por unidad de tiempo sino también por unidad de superficie.
- **Densidad:** Por la falta de canalización lo hacemos asignando a cada peatón una superficie.



### 2.6.3. PRINCIPIOS DE LA CIRCULACIÓN PEATONAL

Los principios de circulación peatonal son análogos a los establecidos para los vehículos, así como las principales magnitudes que la definen: la intensidad, densidad, capacidad y nivel de servicio.

Aparecen de este modo variables inexistentes en la circulación de vehículos, como la circulación contracorriente, la posibilidad de atravesar lateralmente una corriente peatonal ininterrumpida o la propiedad de poder efectuar cambios de dirección sin originar conflictos apreciables.

Además, se presentan una serie de factores complementarios de entorno que influyen en la utilización de este tipo de vías, como son:

- Comodidad: Este factor engloba aspectos de tipo ambiental como la protección frente a los agentes atmosféricos -sobre todo la lluvia-, la existencia de zonas climatizadas, escaparates, marquesinas y el buen estado de conservación de las vías de tránsito.
- Conveniencia: En él se recogen aspectos como la distancia total caminada por el peatón, el camino más corto, las pendientes y el número de aceras confluyentes y otros elementos que contribuyen a facilitar y encauzar el desplazamiento de los viandantes.
- Seguridad vial: Este aspecto se consigue separando los tráficos peatonal y de vehículos, empleando infraestructuras adecuadas para ello y destinando zonas para uso exclusivo de peatones.
- Seguridad pública: Comprende aspectos como el alumbrado, la amplitud del campo visual, la categoría de la vía y su índice de delincuencia.
- Economía: Hace referencia a los costes que se ocasionan al usuario en concepto de demoras y contratiempos, y a la relación del valor de los alquileres inmobiliarios y la densidad de los locales comerciales en el entorno peatonal.



Estos factores complementarios forman en el peatón una idea global de la calidad ambiental existente en las vías peatonales, pudiendo condicionar el modo en que realice sus desplazamientos.

#### **2.6.4. VEHÍCULOS DE MOVILIDAD PERSONAL (VMP)**

La movilidad urbana está cambiando a un ritmo sin precedentes. Los vehículos de movilidad personal se están haciendo un hueco más rápido de lo que las administraciones han sabido ordenar y ahora la Dirección General de Tráfico (DGT) se ha visto forzada a actuar.

En la actualidad los patinetes eléctricos y los demás VMP se encuentran en un limbo legal que no los considera vehículos, ya que para la DGT la expresión mínima de vehículo es una bicicleta (ciclo). La única acción que los ha tratado de ordenar hasta ahora es la [Instrucción 16.V-124](#). Aunque ciudades como Madrid, Barcelona o Valencia han creado sus propias regulaciones basándose en esta Instrucción.

##### **2.6.4.1. INSTRUCCIÓN 16/V-124**

Esta instrucción entró en vigor el 3 de noviembre de 2016. Las nuevas tecnologías han favorecido la aparición de soluciones de movilidad urbana que favorecen los desplazamientos peatonales mediante el auxilio de nuevos modelos de vehículos que rompen la tradicional división peatón /vehículo de motor. Estos vehículos en algunos casos ostentan una masa superior a la de las personas y se mueven a una mayor velocidad que los peatones.

Por tanto, en consecuencia con lo anterior y por carecer hasta el momento de un espacio propio en las vías, los vehículos de movilidad personal (VMP) generan situaciones de riesgo al compartir el espacio urbano con el resto de usuarios.



Hasta que no se elabore una normativa específica sobre los referidos vehículos, la Dirección General de Tráfico propone una serie de criterios:

- *Catalogación técnica y jurídica:* Los Ayuntamientos establecerán limitaciones a la circulación en las vías urbanas, dependiendo, de la velocidad máxima por construcción, masa, capacidad, servicio u otros criterios que se consideren relevantes.
- *Normativa aplicable:* Podrán ubicarse físicamente en el ámbito de la calzada, siempre que se trate de vías expresamente autorizadas por la autoridad local. La autoridad municipal, no obstante, podrá autorizar su circulación por aceras, zonas peatonales, parques o habilitar carriles especiales con las prohibiciones y limitaciones que considere necesarias para garantizar la seguridad de los usuarios de la vía.
- *Permiso o licencia de circulación y conducción:* Los VMP no son vehículos a motor y por tanto no requieren autorización administrativa para circular. Hasta que no se regule definitivamente, no se puede exigir al usuario la titularidad de permiso o licencia de conducción.
- *Aseguramiento:* El aseguramiento obligatorio de los vehículos en su circulación solo tiene lugar cuando estos tienen la consideración de vehículos de motor.

No obstante, el usuario o propietario del VMP podrá contratar voluntariamente un seguro en los términos establecidos en la legislación general de seguros o, deberá contratarlo, en los casos en los que para su utilización en vía urbana, la autoridad local lo establezca.

- *Autorización expresa para determinados VMP y ciclos de más de dos ruedas:* Los VMP y ciclos de más de dos ruedas que estén destinados a realizar actividades económicas de tipo turístico o de ocio deberán obtener previamente una autorización de la Autoridad municipal en la que figurará, en todo caso, el recorrido a realizar,



horario y cuantas limitaciones se establezcan para garantizar la seguridad de los usuarios de la vía.

La ausencia de un marco legislativo a nivel nacional ha obligado a las administraciones locales desbordadas por el uso de VMP a intervenir vía Ordenanza Municipal. Ciudades como Madrid, Barcelona o Valencia han creado sus propias regulaciones basándose a su vez en la Instrucción 16.V-124 de la DGT.

Patinetes eléctricos, monociclos eléctricos, pequeños scooter a motor que no son patinetes ni bicicletas, hoverboard y toda una pléyade de dispositivos de movilidad alternativa son, a día de hoy, poco más que juguetes según la normativa vigente en España. A efectos prácticos no están considerados como vehículos, y por lo tanto no les son aplicables las normativas de circulación.

Como ya hemos adelantado el Gobierno y la DGT se están apresurando para ultimar una clasificación para regular el uso de los vehículos de movilidad personal. Se sigue dudando de que los VMP sean una moda pasajera pero tienen que ser regulados.

El Gobierno de España ha iniciado un proceso de reforma de la Ley de Seguridad Vial que se recogerá en un Decreto Ley para que los VMP sean recogidos como vehículos dentro del Reglamento de Vehículos. No serán considerados vehículos a motor pero sí vehículos de propulsión eléctrica.

La nueva clasificación distinguiría de la siguiente manera a los diferentes vehículos con rango inferior a los tradicionales vehículos a motor:

- *Juguetes*: Patinetes de tracción humana o pequeños dispositivos con motorización eléctrica que no tengan una velocidad superior a 6 km/h.



- *Vehículos de movilidad personal (VMP):* Dispositivos con motorización eléctrica y velocidad máxima de 25 km/h: monociclos eléctricos, patinetes eléctricos, Segway...
- *Bicicletas y bicicletas eléctricas:* con motor o sin motor
- *Categoría L1e:* Vehículos motorizados con una velocidad máxima de 45 km/h.

Bajo estas premisas, la DGT quiere que todos con una serie de requisitos mínimos. Así los que seguirían siendo considerados como juguetes podrán circular por las aceras pero a una velocidad que como máximo será de 6 km/h.

Las bicicletas, bicicletas eléctricas y todos los dispositivos que sean considerados como vehículos de movilidad personal tendrán que contar con una identificación y un certificado de la Comunidad Europea que deberá ser facilitado por el fabricante. La velocidad máxima de los VMP se acotará a 25 km/h y no podrán usarse por las aceras, sólo por ciclocarriles y calles con límite de 30 km/h.

Las bicicletas seguirán como hasta ahora circulando por carriles bici y por la calzada y, al igual que los VMP, sólo podrán utilizar las aceras y los pasos de peatones si lo hacen pie a tierra para respetar la seguridad de los viandantes.

Por último los patinetes eléctricos o de gasolina, con asiento o sin él, o pequeños scooter que hasta ahora se estaban usando como patinetes con velocidad punta superior a 25 km/h se incluirán dentro de la categoría L1e. Este cambio impondrá su equiparación a los ciclomotores exigiendo la matriculación, el seguro y la licencia AM o superior para poder conducirlo. Siempre tendrán que transitar por las calzadas y deberán estar limitados a 45 km/h de velocidad punta.

TIPO	VEHÍCULOS	CIRCULACIÓN	VELOCIDAD MÁXIMA	DOCUMENTACIÓN	MATRÍCULA
Juguetes	Patinete convencional, hoverboard	Aceras	6 km/h	No	No
Vehículos de movilidad personal (VMP)	Patinete eléctrico, monociclo eléctrico, Segway	Carriles bici, calles de hasta 30 km/h	25 km/h	Identificación y homologación	No
Bicicletas y bicicletas eléctricas	Con o sin asistencia eléctrica de cualquier tipo	Carriles bici, todo tipo de calles	La de la vía	Identificación y homologación	No
Categoría L1e	Scooter eléctrico con motorización eléctrica o gasolina	Solo calles	45 km/h	Matrícula	Sí

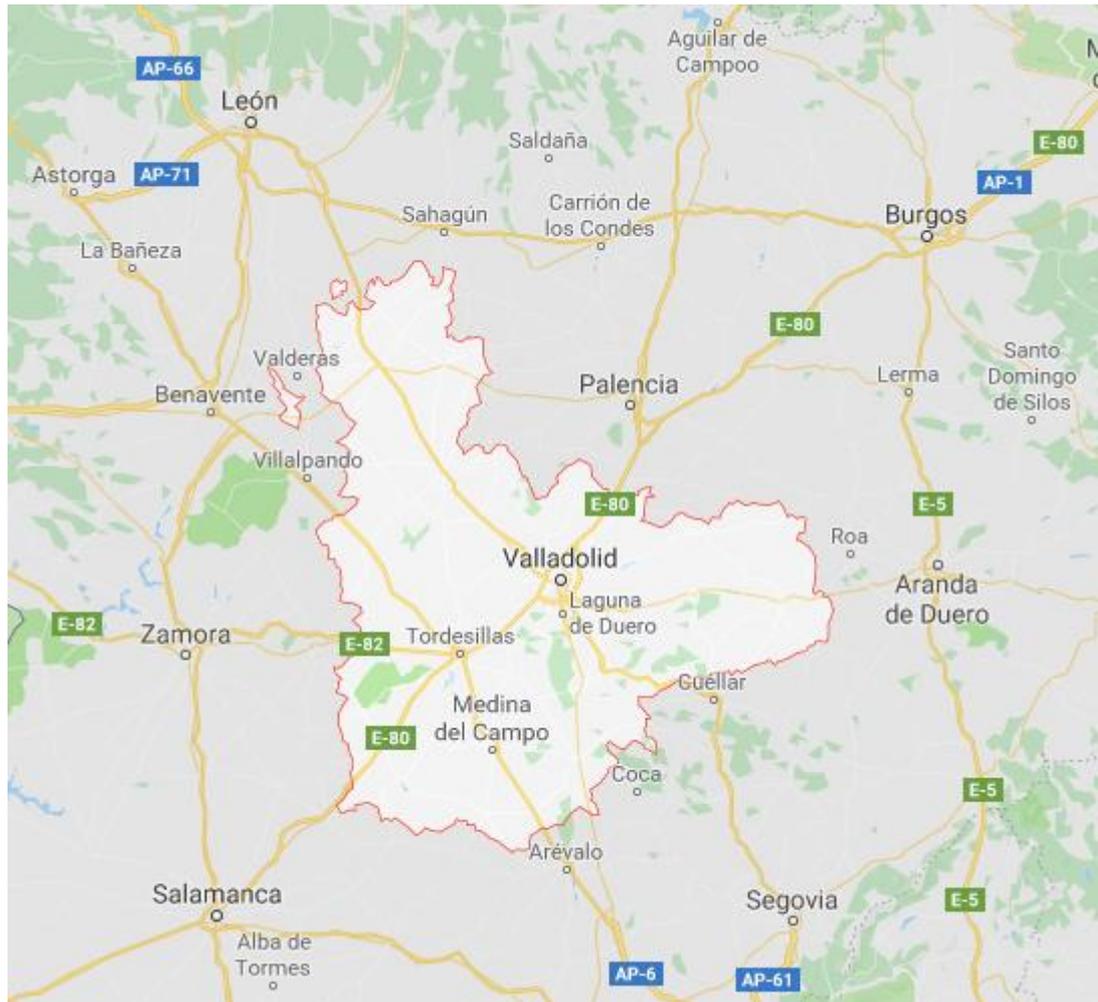
**Tabla 2.3.** Clasificación de VMP.



# CAPÍTULO 3: ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL TRÁFICO EN LA RONDILLA

## 3.1. INTRODUCCIÓN

El área de aplicación de este proyecto es el barrio de la Rondilla, perteneciente a la ciudad de Valladolid, considerado dicho barrio comprendido dentro del entorno que forman las calles Rondilla de Santa Teresa, Santa Clara, Avenida Palencia y los ríos Pisuerga y Esgueva. El barrio de la Rondilla surgió del despegue industrial que Valladolid tuvo en los años 60-70, en los que la ciudad creció de forma desordenada extendiéndose en todas las direcciones e instalándose numerosas industrias a lo largo de las carreteras de acceso sin seguir ningún plan de ordenación. Esto hace que el barrio padezca los típicos problemas inherentes al crecimiento urbano no planificado: congestión del tráfico, fuertes densidades en todo el suelo urbano, falta de espacios libres y equipamientos.



**Figura 3.1:** Mapa de situación de Valladolid.

**Fuente:** Google Maps.

Las comunicaciones por el Sur entre el resto de la ciudad y el barrio, se realiza en estos momentos a través de la calle Cardenal Torquemada, que constituye la arteria principal de distribución del tráfico Norte-Sur, y por el Paseo del Renacimiento y calle Tirso de Molina hasta conectar con la Calle Torquemada. La salida del barrio hacia el centro, se produce a través de tres calles paralelas que desembocan en la Rondilla de Santa Teresa, estas tres calles son: Portillo de Balboa, Moradas y Mirabel.



*Figura 3.2. Mapa barrio de la Rondilla.*

*Fuente: Ortofoto de la Junta de Castilla y León (2010) y elaboración propia.*

La principal penetración del tráfico por el Este hacia la Rondilla se realiza por la calle Soto, que constituye la arteria principal de distribución del tráfico Este-Oeste, es decir, desde la Avenida Palencia hasta la calle Mirabel. La principal vía de salida del barrio hacia el Este, se efectuará por el eje formado por las calles Cardenal Cisneros y Cerrada. La salida y entrada del barrio hacia el Oeste se efectuará por el puente de Doña Eylo y por la calle Rondilla de Santa Teresa.

Algunos datos del barrio se dan a continuación:

- Superficie total de 82 hectáreas aproximadamente (2,5% del suelo urbano de Valladolid) sobre la que se ubican 11.645 viviendas.
- Población de 24.524 habitantes (según datos actualizados por el Ayuntamiento a 1 de Julio de 2010)
- Cuenta con un total de 9.084 turismos, que dan lugar a unos niveles de motorización de 384 vehículos por mil habitantes.
- Parque de vehículos: 10.890



La mayoría de los datos que se han usado en el modelo del barrio de la Rondilla han sido aportados por el Gabinete de Movilidad Urbana, Área de Seguridad y Vialidad del Ayuntamiento de Valladolid. Los planos de la zona de estudio, datos de espiras y los planes de control semafórico nos aportan que la simulación sea más fiable y parecida a la realidad.

La veracidad de las conclusiones de nuestro estudio estará condicionada por la elección del modelo unido al análisis de datos que más se adapte a las características del tráfico.

El estudio que vamos a realizar será de la situación de la Rondilla, tanto de la actual como de una posible situación en el futuro.

- **Intervalo de tiempo a estudiar.**

En este trabajo se busca dar solución al problema de circulación de los vehículos de movilidad personal creando un carril por el que puedan circular sin tener que hacerlo ni por las aceras ni por las carreteras, ya que no es posible combinarlos ni con el tráfico de vehículos ni con el tráfico peatonal.

Para conocer cuál es el intervalo del día en el que la circulación de vehículos en la ciudad de Valladolid es el mayor, utilizamos el Plan Integral de Movilidad Urbana Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid (PIMUSSVA). En él se puede ver que el tramo del día en el que mayor número de desplazamientos tiene lugar es el periodo que transcurre de 8:00 a 9:00 y de 14:00 a 15:00 produciéndose casi un 20% del total de los viajes diarios en la ciudad entre los dos. Pero el mayor volumen de desplazamientos se registra en el periodo de 14:00 a 15:00, en el cual se realizan 60.502 desplazamientos que representan el 9,2% del total.

Hora	Viajes	%
6 - 7	8.479	1,3%
7 - 8	28.537	4,4%
8 - 9	49.383	7,5%
9 - 10	37.873	5,8%
10 - 11	33.571	5,1%
11 - 12	46.283	7,1%
12 - 13	46.204	7,1%
13 - 14	49.874	7,6%
14 - 15	60.502	9,2%
15 - 16	45.274	6,9%
16 - 17	27.744	4,2%
17 - 18	47.988	7,3%
18 - 19	41.270	6,3%
19 - 20	44.235	6,8%
20 - 21	41.302	6,3%
21 - 22	22.469	3,4%
22 - 5	24.328	3,7%
<b>Total</b>	<b>655.316</b>	<b>100,0%</b>

**Figura 3.3.** Distribución de los viajes según hora de inicio.

**Fuente:** PIMUSSVA, *Plan Integral de Movilidad Urbana Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid, E., 2015, p. 54.*

Ajustando nuestra simulación a la hora punta, fijaremos el intervalo de tiempo entre las 13:30 hasta las 15:30 para tener en cuenta el tramo de mayor influencia (14:00 a 15:00) y la subida y bajada de tráfico anterior y posterior a esa hora punta.

### **3.2. PASOS SEGUIDOS EN EL ESTUDIO DEL TRÁFICO EN LA RONDILLA**

Se ha realizado un seguimiento exhaustivo del tráfico en la Rondilla, así como un estudio detallado de las propias características del barrio.



Los pasos seguidos para la realización del estudio del tráfico en la Rondilla han sido los siguientes:

1. Estudio de las características del barrio (aparcamientos, anchura de aceras y calzadas, problemas, etc.)
2. Realización de una serie de aforos previos para conocer los futuros puntos de realización de encuestas.
3. Realización de encuestas en las principales vías de entrada y salida a la Rondilla, para la posterior elaboración de una matriz origen y destino de la Avenida Palencia, así como un aforo simultáneo en los puntos de encuesta.
4. Simulación del tráfico en la Rondilla mediante el programa AIMSUN, y posible situación en el futuro.

### **3.3. DESCRIPCIÓN Y CONTRUCCIÓN DEL MODELO**

#### **3.3.1. SOFTWARE AIMSUN**

##### **3.3.1.1. INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE AIMSUN**

La realización de este proyecto se ha llevado a cabo a través de AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks). AIMSUN es un software de modelado de transporte integrado de origen español, desarrollado por la empresa TSS (Transport Simulation Systems) y la Universidad Politécnica de Cataluña en 1989.

Esta herramienta es la única en el mercado que integra tres tipos de modelado de transporte: Modelado **macroscópico** o asignación estática de tráfico, modelado **microscópico** o asignación dinámica y un nuevo simulador **mesoscópico**.

AIMSUN destaca por la excepcional velocidad de sus simulaciones. Permite simular vehículo a vehículo interacciones que puedan suceder en la realidad como adelantamientos, giros conflictivos, formaciones de colas o demás problemas que puedan surgir en las carreteras, modelando una red de



transporte a nivel microscópico. Y permite definir el comportamiento de cada conductor para la selección de rutas antes y durante el viaje mediante diferentes algoritmos de selección basados en el cálculo de los costes y probabilidades de las diferentes opciones.

Por tanto, con AIMSUN es posible gestionar y controlar el tráfico rodado ofreciendo la posibilidad de evaluar y mejorar cualquier combinación de estrategias posibles.

### **3.3.1.2. DESARROLLO DE UN MODELO AIMSUN**

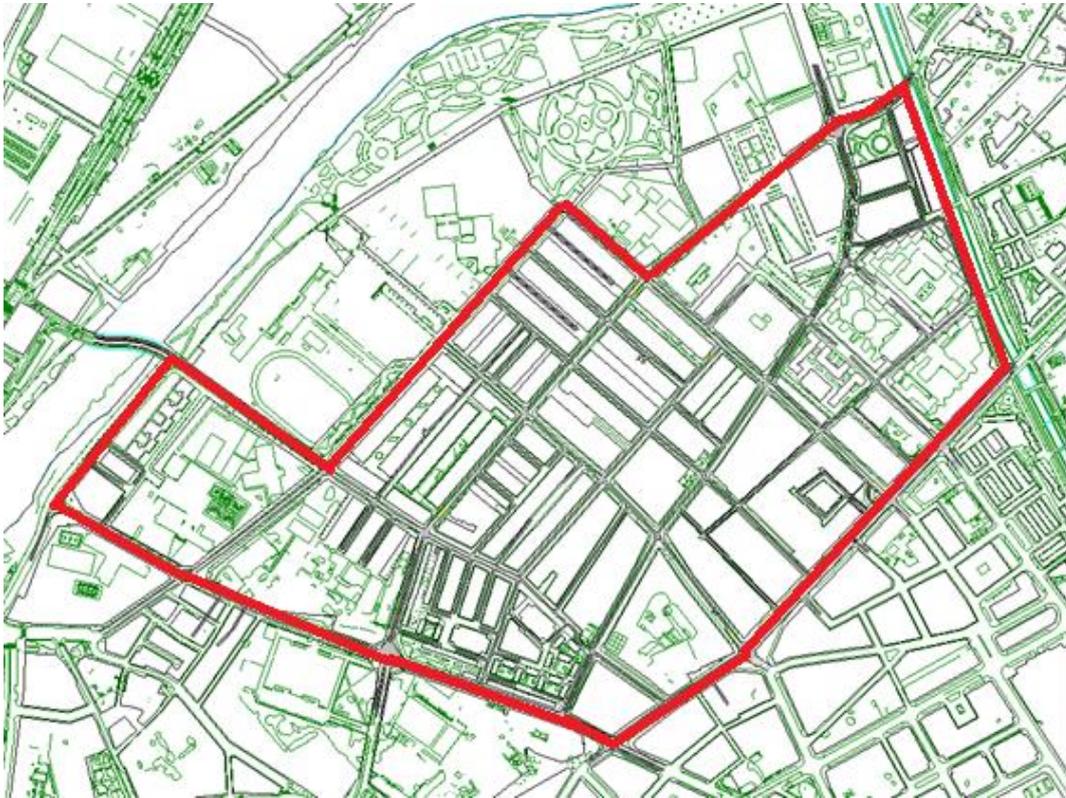
Para realizar el desarrollo de un modelo con este software es necesario seguir una serie de pasos:

1. Crear y editar el modelo a partir de planos o imágenes de la red viaria, representando las distintas carreteras, cruces y rotondas a través de segmentos e intersecciones, pasos de peatones, señales viarias y todos los elementos geométricos de los que conste la red
2. Determinar la medida de los parámetros necesarios. En este estudio se exponen características, como parámetros y herramientas de los modelados microscópicos y macroscópicos.
3. Validación del modelo. Consiste en la comparación de los datos reales disponibles con los resultados de la simulación, de acuerdo a unos límites de error, para evaluar en qué medida los resultados corresponden a la realidad.
4. Evaluar y analizar los resultados obtenidos.

### **3.3.2. DATOS DE PARTIDA**

Como se ha dicho anteriormente, el primer paso necesario para el desarrollo de este proyecto, ha sido la realización de un modelo de la Rondilla lo más parecido posible al real que sirviera como elemento de apoyo para estudios posteriores.

El dato de partido ha sido un plano de la ciudad de Valladolid en formato CAD, dónde delimitamos la zona correspondiente al estudio.



*Figura 3.4. Mapa de la zona de estudio.*

*Fuente: Ayuntamiento de Valladolid.*

Los elementos que componen el modelo son los siguientes:

- **Secciones:** Vías, número de carriles, tipo de vía, estimación de capacidad de vías y velocidad de vehículos.
  - **Nodos:** Cruces e intersecciones.
  - **Señales de tráfico:** Semáforos, ceda el paso y paso de peatones.
  - **Transporte público:** Existencia de líneas de autobús, paradas, etc.
- 
- **Secciones.**

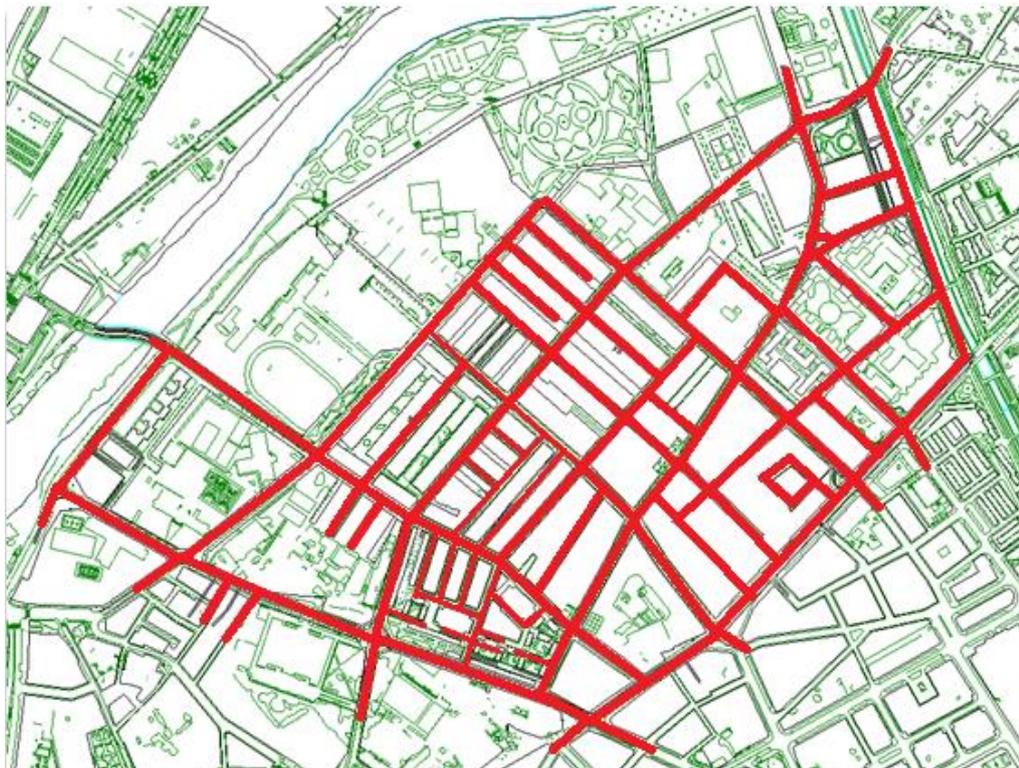
Las secciones representan segmentos de carretera, con ellas se realiza el modelo de toda la red viaria. En las secciones se pueden modificar el número de carriles que sean necesarios y el ancho de estos. Además permiten limitar

la velocidad de circulación de los vehículos por cada una de ellas y su capacidad, es decir, el volumen máximo de vehículos por hora que pueden circular.

En el proyecto que se ha realizado se han creado secciones con dos usos distintos, o mejor dicho, destinadas a dos tipos de vehículos distintos.

La mayoría de las secciones son para simular el tráfico de los coches y autobuses cuyas características son las mismas que las de cada carretera del barrio de la Rondilla.

En la figura 3.5. se han marcado sobre el mapa de la Rondilla las calles seleccionadas que representarán las secciones.



**Figura 3.5.** Mapa de la zona de estudio.

**Fuente:** Ayuntamiento de Valladolid.

Para una de las propuestas que haremos del modelo se ha incluido una sección a lo largo de toda la Avenida Palencia paralela a la sección anterior por

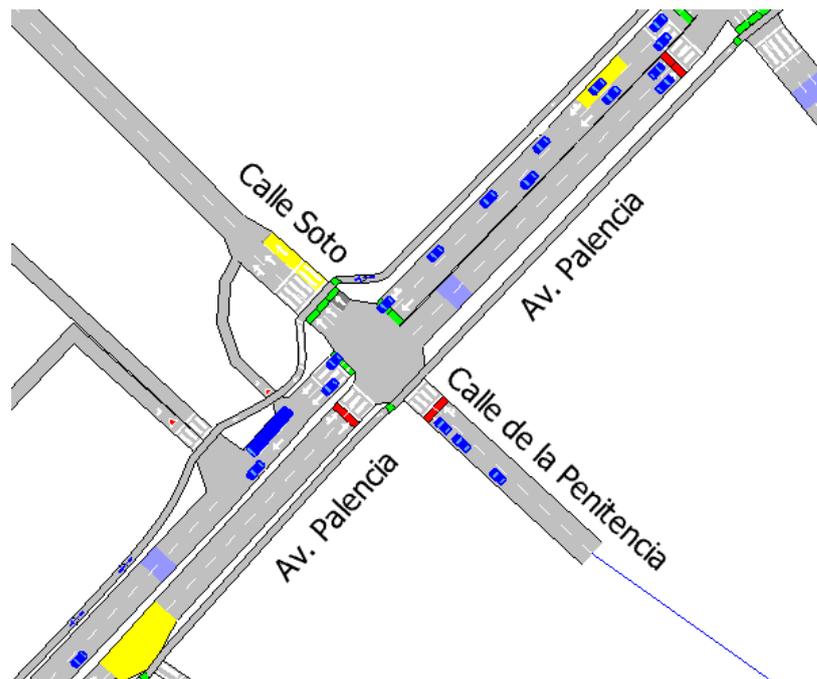


- **Nodos.**

Son puntos de una red en los que los enlaces se unen y un viaje puede cambiar de dirección. Las secciones se unen mediante intersecciones para representar los cruces denominados “nodos” y las rotondas de la red que simplemente son una sucesión de secciones unidas entre ellas mediante nodos.

Dentro de los cuadros de diálogo de cada nodo se incluyen las señales de ceda el paso y stop y los grupos semafóricos con los que se crea el plan de control semafórico.

En la figura 3.7. se muestra un ejemplo de uno de los nodos utilizados en las simulaciones que representa la intersección de la Avenida Palencia, la Calle Soto y la Calle de la Penitencia.



**Figura 3.7.** Nodo 118181.

**Fuente:** Software AIMSUN.

En esta intersección aparecen tres tipos de señales de tráfico, por tanto es uno de los mejores ejemplos para explicar. Para representarlo en las características del nodo tendremos que configurar cada tipo de señal en el giro

que corresponda como se ve en la figura 3.8. Si no se indica el tipo de señal puede ser porque no necesite o porque debe ir un semáforo.

Nodo: 11818 (Capa: Network)

Principal | Grupos Semafóricos | Ceda el Paso | Series temporales | Atributos

Nombre: [ ] Id externo: [ ]  'Yellow Box'

Giros

Mostrar Secciones

	Longitud (metros)	Velocidad Automática	Velocidad (km/h)	dad en el 'Yellow B	d en el 'Yellow Box	Aviso
1	13.5	<input type="checkbox"/> Sí	16,17	<input type="checkbox"/> Sí	10,00	Ceda el Paso
2	18.1	<input checked="" type="checkbox"/> Sí	50,00	<input checked="" type="checkbox"/> Sí	10,00	Stop
3	6.5	<input checked="" type="checkbox"/> Sí	50,00	<input checked="" type="checkbox"/> Sí	10,00	
4	7.0	<input checked="" type="checkbox"/> Sí	26,08	<input checked="" type="checkbox"/> Sí	10,00	

Funciones de Coste (Dinámica)

Inicial:  Dinámico:

Parámetros (Macro)

Volumen adicional:  PCUs Coste Definido por el Usuario:

Segundo Coste Definido por el Usuario:  Tercer Coste Definido por el Usuario:

Función de Penalización de Giro:

Figura 3.8. Propiedades del Nodo 118181.

Fuente: Software AIMSUN.

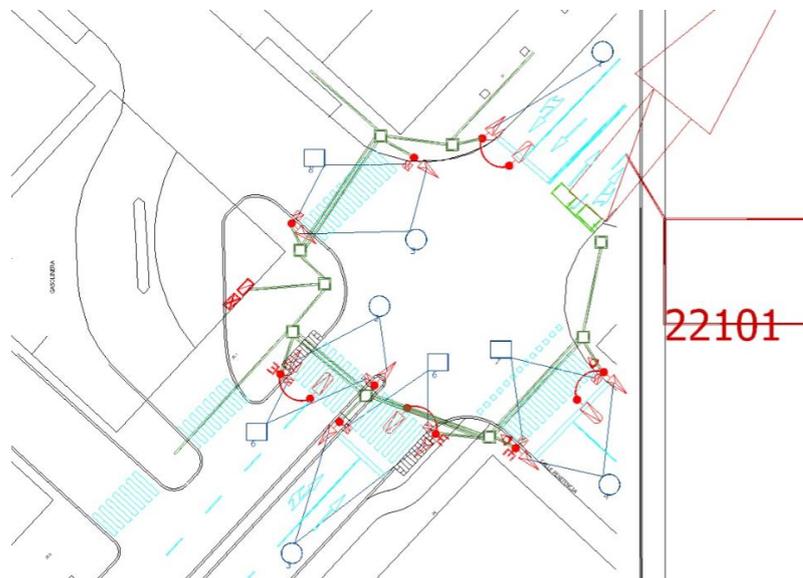
- **Señales de tráfico.**

Los semáforos son los elementos reguladores del tráfico por excelencia en las zonas urbanas. En cada uno de los accesos a la intersección se coloca al menos un semáforo. Teniendo en cuenta las posibles combinaciones de luces rojas y verdes que pueden estar simultáneamente encendidas en la intersección, se definen dos conceptos:

- *Fase*: Tiempo durante el que puede realizarse un determinado movimiento dentro de la intersección, es decir, el tiempo durante el cual una serie de semáforos permanecen en verde.
- *Ciclo*: Tiempo necesario para que vuelvan a repetirse las mismas condiciones de regulación dentro de la intersección, dicho de otro modo, el resultado de la suma de las diferentes fases.

Las intersecciones reguladas por semáforos son una de las situaciones más complejas en el sistema circulatorio. El análisis de intersecciones reguladas por semáforos debe considerar una gran variedad de condiciones preexistentes, incluida la cantidad y la distribución del tráfico rodado, la composición del mismo, las características geométricas, y los detalles de la semaforización de la intersección.

Cada intersección tiene asociado un plano con la situación de los semáforos y los tiempos en verde, ámbar y rojo de cada uno. La siguiente figura muestra la intersección de la Avenida Palencia con la Calle Penitencia y la Calle Soto.



**Figura 3.9.** Situación de semáforos en la intersección de la Av. Palencia y la C/ Penitencia.

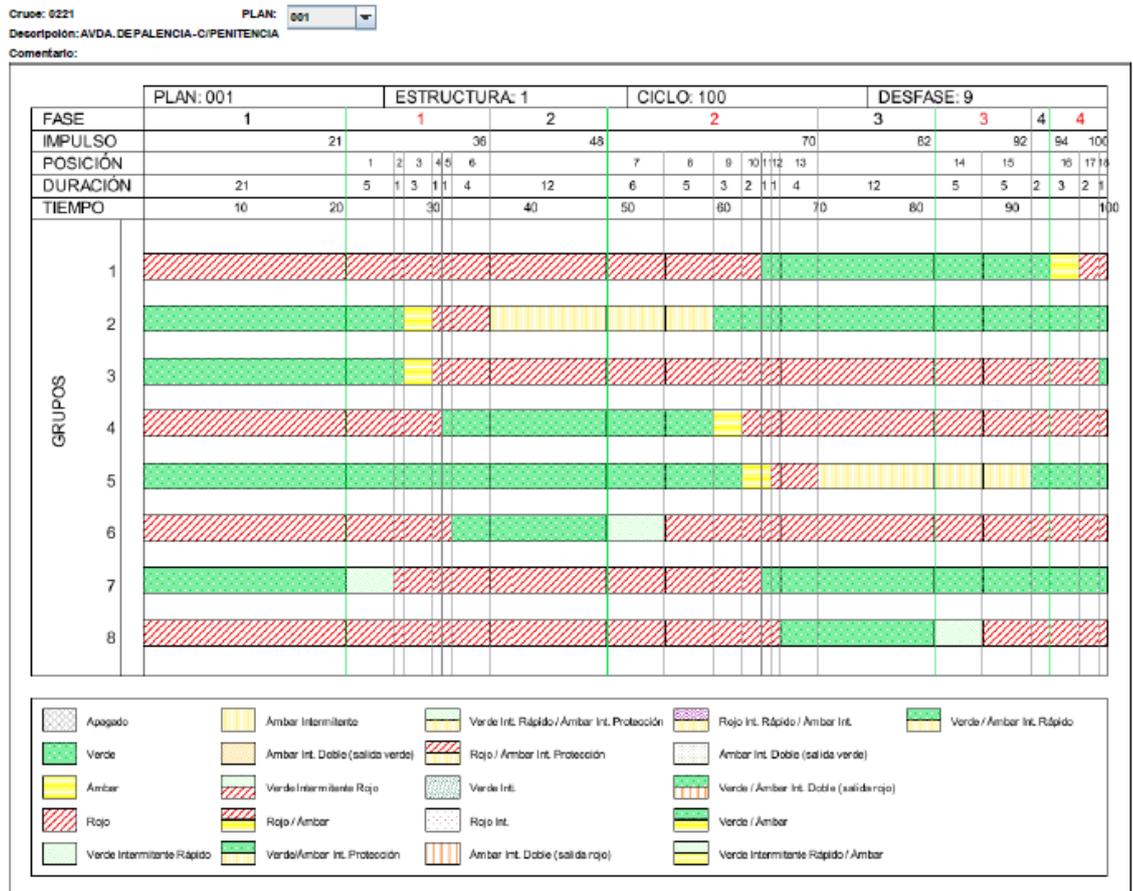
**Fuente:** Ayuntamiento de Valladolid.

- **Plan de control semafórico.**

Para la creación del plan de control semafórico hay que crear previamente un grupo semafórico en cada uno de los nodos correspondientes a las intersecciones en las que se quieran incluir semáforos.

El plan de control semafórico se realizó con los datos proporcionados por el Ayuntamiento de Valladolid. Esta información se explica más detalladamente en el Apéndice I.

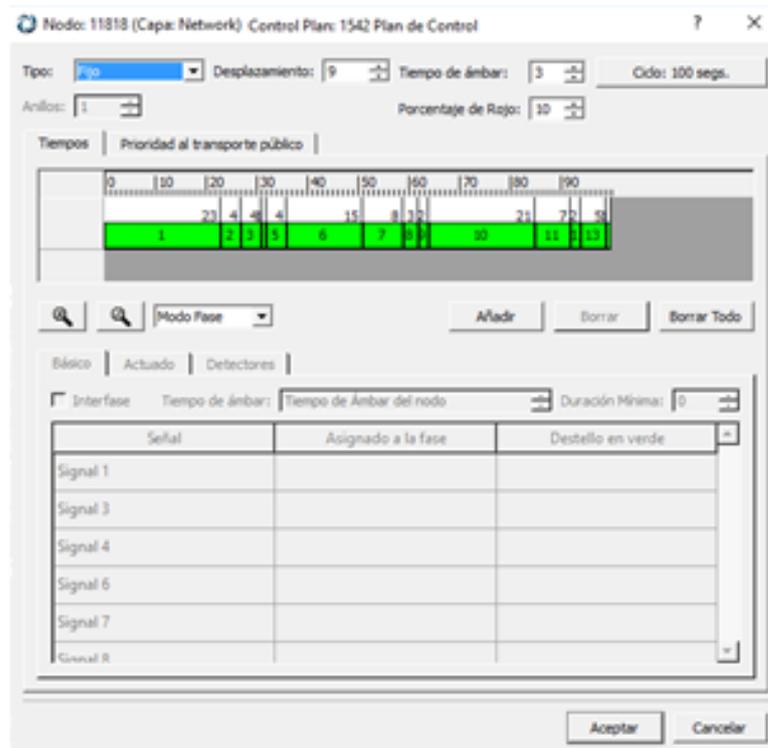
En el plan de control semafórico también se muestran los ciclos, es decir, el tiempo en verde, ámbar y rojo de cada grupo semafórico, dónde a cada número definido en el plano anterior le corresponde un determinado tiempo como se puede ver en la figura 3.10.



**Figura 3.10.** Diagrama de fases Av. Palencia y C/Penitencia.

**Fuente:** Ayuntamiento de Valladolid.

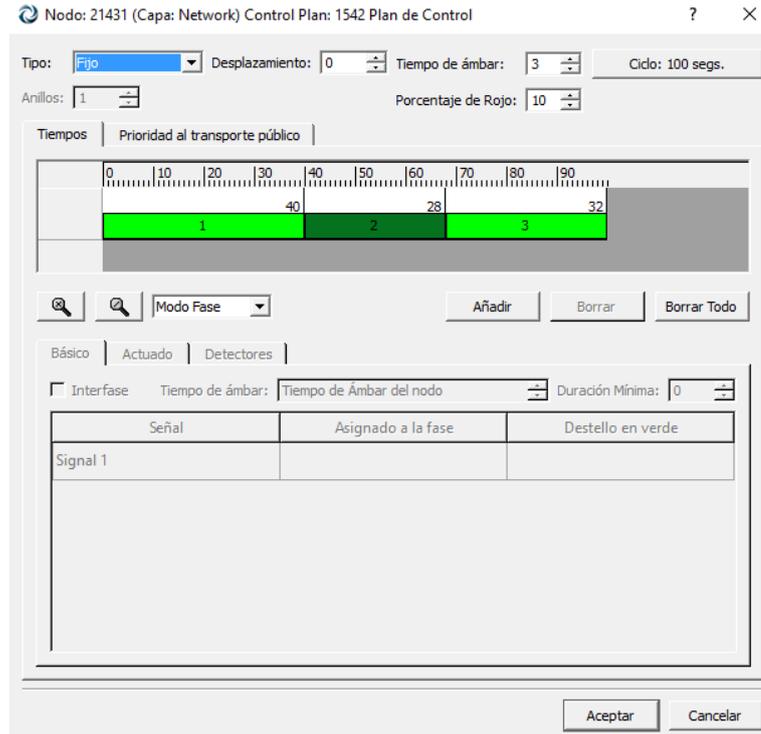
La representación de este diagrama de fases para el nodo que corresponde con esta intersección (Nodo 118181) y que hemos visto en el punto anterior, se realiza como se muestra en la figura 3.11:



**Figura 3.11.** Plan de control del Nodo 118181.

**Fuente:** Software AIMSUN.

En la propuesta de simulación al añadir la sección para los vehículos de movilidad personal la creación del plan semafórico para los distintos nodos es mucho más sencillo, ya que no se tienen en cuenta tantas fases. En la figura 3.12. aparece el plan de control para el nodo de la sección de los vehículos de movilidad personal (Nodo 21431) de esa misma intersección.



**Figura 3.12.** Plan de control del Nodo 21431.

**Fuente:** Software AIMSUN.

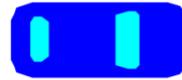
### 3.3.2.1. MODELADO DE LA DEMANDA DE TRÁFICO

- **Modelado de vehículos.**

Por defecto existen vehículos cuyos parámetros están determinados según una distribución normal, de forma que cada vehículo que se representa es diferente del resto. Estos parámetros son fundamentales en el proceso de calibración del modelo.

Para el modelado de nuestra red se han utilizado, en las dos primeras simulaciones, dos tipos de vehículos y en las dos últimas se ha añadido un tercer vehículo, protagonista del proyecto.

- **Coche:** A partir de los datos obtenidos de los coches sacaremos unas conclusiones de nuestros modelos, ya que uno de los principales objetivos es mejorar el tráfico o igualar la situación actual en la zona de estudio.



**Figura 3.13.** Representación 2D del coche en AIMSUN.

**Fuente:** Software AIMSUN.

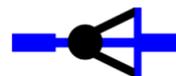
- *Autobús:* Los datos de los buses no se comparan pero se incluyen en el modelo para hacerlo lo más parecido posible a la realidad.



**Figura 3.14.** Representación 2D del autobús en AIMSUN.

**Fuente:** Software AIMSUN.

- *Vehículos de movilidad personal (patinetes eléctricos):* Son los protagonistas del proyecto. Se incluyen en las últimas simulaciones para las cuales se crea una sección por la que circularán intentando dar solución a la difícil situación actual.



**Figura 3.15.** Representación 2D de los VMP en AIMSUN.

**Fuente:** Software AIMSUN.

- **Modelado de la demanda de tráfico.**

En el modelo que hemos realizado, para obtener los datos de la demanda se han combinado los datos de espiras proporcionados por el ayuntamiento con planes de aforos “in situ”.

La demanda de tráfico se representa a través de matrices de origen-destino (matrices O/D).

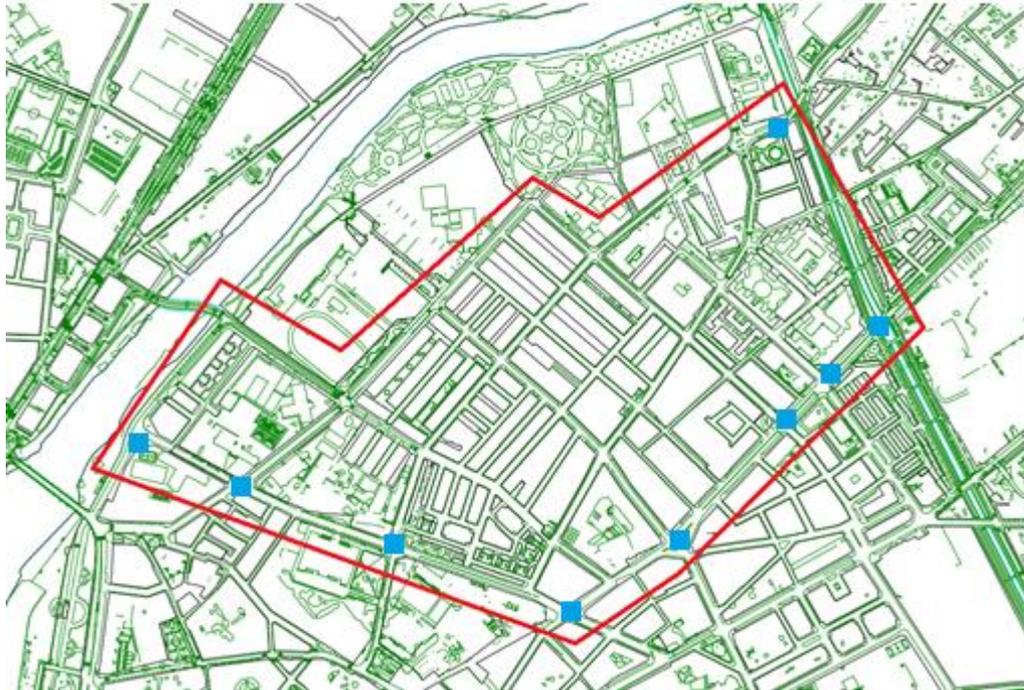
- *Matrices O/D*: Dada una serie de puntos de origen y de destino de la red viaria, esta matriz relaciona cada origen con cada destino, representando el número de vehículos que parte desde cada origen a cada destino. A estos puntos de origen y destino se les denomina ‘centroides’.

Estas matrices se definen por cada tipo de vehículo y por cada periodo de tiempo que se quiera representar hasta que se cubra toda la demanda de tráfico del periodo completo de estudio. Cuantos más pequeños sean estos periodos de tiempo se alcanza mayor precisión ya que la demanda de tráfico es un parámetro dinámico.

AIMSUN permite realizar operaciones en las matrices como multiplicaciones, restas y sumas, facilitando así los cálculos de las futuras simulaciones.

Para realizar la matriz O/D se ha utilizado la información de las encuestas de origen-destino de las que se disponía de proyectos anteriores, que tratan de identificar la forma en que durante un día típico, una muestra significativa de cierto grupo de personas realiza sus viajes cotidianos. Uno de los datos de la encuesta es el origen y destino de los viajes. La encuesta se realizó en la vía pública, encuestando a parte de los vehículos que utilizaban la calle en esos momentos.

Los sitios de encuestación pueden verse en la figura 3.16:



**Figura 3.16.** Lugares donde se realizaron las encuestas.

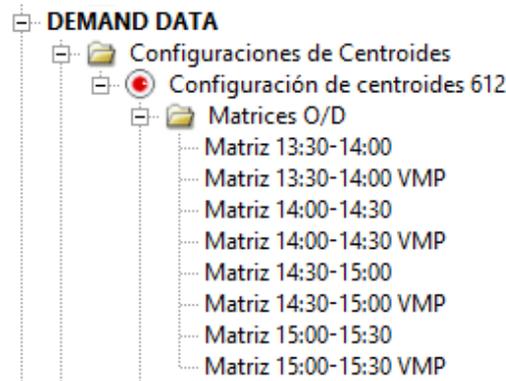
**Fuente:** Ayuntamiento de Valladolid.

La encuesta se realizó los días 26, 27, 28 y 29 de noviembre de 2015. Los lugares escogidos para su realización fueron vías de acceso o de salida de la Rondilla, escogidos tras la realización de aforos previos.

La duración de la encuesta a cada persona fue de aproximadamente un máximo de 30 segundos y en la mayoría de las calles se realizó mientras los semáforos estaban el rojo.

Una vez realizadas las encuestas, el objetivo fue su estudio para la elaboración de las matrices O/D, las cuales representarán un intervalo de tiempo de 30 minutos cada una y sus valores dependerán del periodo horario y el vehículo al que representan.

En nuestro modelo se diferencian un total de ocho matrices. Cuatro de ellas hacen referencia al coche y las otras cuatro a los VMP. Para cada tipo de vehículo se distinguen cuatro periodos horarios: **13:30- 14:00, 14:00-14:30, 14:30-15:00, 15:00-15:30.**



**Figura 3.17.** Matrices O/D.

**Fuente:** Software AIMSUN.

- **Análisis de la situación actual.**

Para poder fijar las directrices de toda la actuación debe conocerse exactamente el estado actual del sistema. Este conocimiento debe alcanzar tres aspectos fundamentales: la **descripción** de la red actualmente existente, la **cuantificación** de la demanda actual de tráfico de las distintas secciones de la red y la **valoración** del funcionamiento de la red presente.

La información de la demanda de tráfico se ha definido con los datos de las espiras de los puntos de medida proporcionados por el Ayuntamiento (datos de aforos por periodos horarios) y los datos que aparecen en el Plan Integral de Movilidad Urbana, Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid (PIMUSSVA).

La precisión de estos datos y su posterior análisis es uno de los factores que más determinan la exactitud con la que se calcula.

Los datos de las espiras muestran el valor de la Intensidad Media Diaria (IMD), es decir, el número medio de vehículos que pasan por una sección al día medido a lo largo de un año. Los datos se muestran en la tabla 3.1.

UBICACIÓN	P.M.	2015	
		Laboral	Festivo
RONDILLA SANTA TERESA -> GONDOMAR (CARDENAL TORQUEMADA)	PM020301	5184	3180
RONDILLA SANTA TERESA -> PASEO RENACIMIENTO (SANTA CLARA)	PM020401	11291	7405
GONDOMAR -> CHANCILLERÍA (CHANCILLERÍA)	PM020501	3473	2052
REAL DE BURGOS -> HUELGAS (CHANCILLERÍA- ENTRADA)	PM020602	9241	6387
CARDENAL TORQUEMADA -> RONDILLA SANTA TERESA (SAN PABLO)	PM021301	9393	6166
AVDA. PALENCIA -> SANTA CLARA (AMOR DE DIOS)	PM022001	7020	4925
AMOR DE DIOS -> MADRE DE DIOS (AVDA. PALENCIA)	PM022002	3347	2160
AVDA. PALENCIA -> AVDA. SANTANDER (PENITENCIA)	PM022101	4680	3074
AVDA. PALENCIA -> SANTA CLARA (PENITENCIA)	PM022102	7412	5193
AVDA. PALENCIA -> AVDA. SANTANDER (REAL DE BURGOS)	PM022201	4123	2845
RÁBIDA -> PORTILLO DE BALBOA (CARDENAL TORQUEMADA)	PM023201	3043	2038
RÁBIDA -> EURO (CARDENAL TORQUEMADA)	PM023202	1972	1317

**Tabla 3.1.** Datos de aforo permanente expresados en IMD, vehículos/día.

**Fuente:** PIMUSSVA, *Plan Integral de Movilidad Urbana Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid, E., 2015, p. 61.*

Una vez definidos los fundamentos teóricos, es indispensable recabar información acerca de las características de la circulación de vehículos con la que lograr una validación aceptable del modelo. Para ello comparamos los datos de flujo de vehículos obtenidos en AIMSUN y los datos de las espiras introducidos en el AIMSUN. Se multiplicaron los datos de las IMD de las espiras

por el porcentaje que representa el total de viajes del transporte privado durante la hora de la simulación, en nuestro caso la hora punta (14:00 -15:00), periodo en el que se registra mayor volumen de desplazamientos a lo largo del día. Este dato aparece en el Plan Integral de Movilidad Urbana, Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid (PIMUSSVA), el cual representa un 8,6% del total de viajes y corresponde con 7.349 desplazamientos.

Hora	A pie		Transporte Público		Vehículo privado		Otros		Total	
	Nº viajes	%	Nº viajes	%	Nº viajes	%	Nº viajes	%	Nº viajes	%
6 - 7	864	0,2%	146	0,2%	6.011	3,1%	1.457	5,5%	8.479	1,3%
7 - 8	7.053	2,0%	3.892	4,5%	16.595	8,4%	998	3,8%	28.537	4,4%
8 - 9	21.022	6,1%	6.236	7,3%	19.888	10,1%	2.238	8,5%	49.383	7,5%
9 - 10	21.788	6,3%	4.001	4,7%	10.449	5,3%	1.634	6,2%	37.873	5,8%
10 - 11	23.259	6,7%	4.962	5,8%	4.536	2,3%	813	3,1%	33.571	5,1%
11 - 12	34.653	10,0%	5.874	6,9%	5.146	2,6%	610	2,3%	46.283	7,1%
12 - 13	35.748	10,3%	5.038	5,9%	4.910	2,5%	507	1,9%	46.204	7,1%
13 - 14	29.307	8,5%	7.040	8,2%	11.261	5,7%	2.266	8,6%	49.874	7,6%
<b>14 - 15</b>	<b>26.907</b>	<b>7,8%</b>	<b>7.349</b>	<b>8,6%</b>	<b>22.855</b>	<b>11,6%</b>	<b>3.392</b>	<b>12,9%</b>	<b>60.502</b>	<b>9,2%</b>
15 - 16	18.071	5,2%	4.907	5,7%	20.003	10,2%	2.292	8,7%	45.274	6,9%
16 - 17	12.906	3,7%	4.173	4,9%	9.884	5,0%	781	3,0%	27.744	4,2%
17 - 18	27.689	8,0%	8.460	9,9%	10.446	5,3%	1.393	5,3%	47.988	7,3%
18 - 19	23.451	6,8%	5.310	6,2%	11.013	5,6%	1.495	5,7%	41.270	6,3%
19 - 20	24.784	7,2%	5.584	6,5%	12.991	6,6%	876	3,3%	44.235	6,8%
20 - 21	20.456	5,9%	6.976	8,2%	12.761	6,5%	1.110	4,2%	41.302	6,3%
21 - 22	10.350	3,0%	3.353	3,9%	7.639	3,9%	1.127	4,3%	22.469	3,4%
22 - 5	8.247	2,4%	2.236	2,6%	10.485	5,3%	3.359	12,8%	24.328	3,7%
<b>Total</b>	<b>346.555</b>	<b>100,0%</b>	<b>85.538</b>	<b>100,0%</b>	<b>196.874</b>	<b>100,0%</b>	<b>26.349</b>	<b>100,0%</b>	<b>655.316</b>	<b>100,0%</b>

**Figura 3.18.** Distribución de los viajes según hora de comienzo y modo básico.

**Fuente:** PIMUSSVA, Plan Integral de Movilidad Urbana Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid, E., 2015, p. 56.

Los cálculos realizados hacen referencia al número de vehículos por hora y serán los que usaremos en la simulación de nuestro modelo mediante ajustes en la Matriz O/D para conseguir la mayor exactitud posible.

- **Análisis de la situación futura.**

Una etapa fundamental en un proceso de planteamiento de transportes que afecta a un área determinada es la estimación del número de viajes de personas o de vehículos que han de producirse en un cierto futuro, y de su distribución.

Para poder escoger acciones que permitan alcanzar los objetivos propuestos en el planteamiento, es necesario disponer de una metodología que permita efectuar previsiones y conocer cuál será el funcionamiento del sistema de carreteras en un futuro si se llevan a cabo o no determinadas actuaciones.

El método escogido para realizar el modelo de la situación futura ha sido el **método del factor uniforme**.

- *Método del factor uniforme*: Supone que el tráfico futuro entre dos zonas ( $X_i$ ) será igual al actual ( $X_0$ ), multiplicado por un factor de crecimiento uniforme para todo el área ( $F$ ).

$$X_i = F_{AB} \times X_0$$

Con este método sólo se puede esperar una precisión relativa, especialmente a largo plazo. La razón de ellos es que la demanda de tráfico depende de un gran número de factores, muchos de ellos independientes de la red de carreteras, tales como el nivel de desarrollo económico, la localización de las distintas actividades industriales o la política llevada a cabo con otros medio de transporte. Para hacer una previsión correcta del tráfico habría que disponer de proyecciones precisas de todos estos factores, lo que en muchos casos es imposible.

### 3.3.3. TIPO DE MODELO

El tipo de modelado que se ha utilizado de entre los tres diferentes que permite realizar AIMSUN ha sido el modelado microscópico.

La realización de nuestra simulación se ha hecho desde el punto de vista dinámico, ya que hemos observado las simulaciones vehículo a vehículo, la formación de colas, el cambio de los semáforos y el resto de características de la red durante la simulación para poder identificar y resolver los problemas existentes. El tipo de modelado elegido es el único que permite este tipo de estudio.

Para los objetivos que se quieren alcanzar en el proyecto este es el modelo más adecuado, ya que el tamaño de la red y los datos de los que disponemos nos lo permiten.

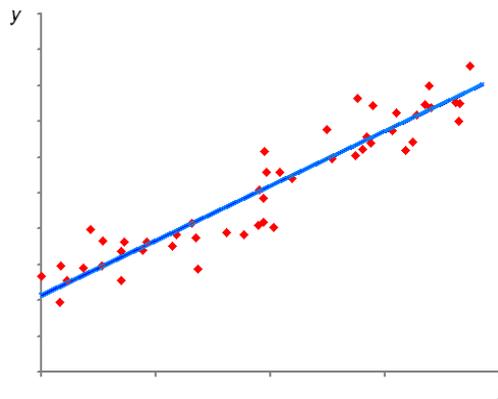
### 3.3.4. VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo se ha llevado a cabo mediante una regresión lineal, ya que esta técnica estadística nos permite modelar e investigar la relación que hay entre dos o más variables.

En nuestro caso para identificar la validez del modelo utilizamos dos variables,  $x$  e  $y$ .

- $x$ : variable independiente de la regresión que representa los datos reales de las espiras.
- $y$ : variable dependiente de la regresión que representa los datos que se recogen en los detectores que se han situado en el modelo, igual que las espiras en la realidad.

La regresión que hemos obtenido será similar a la que se muestra en la figura 3.19.



**Figura 3.19:** Representación de valores  $(x, y)$ .

*Fuente:* Elaboración propia.



Como se observa, la nube de puntos se ajusta a una recta cuya ecuación será del tipo:

$$y = ax + b$$

donde:

- El valor de **b** es el que toma la variable independiente cuando la variable dependiente  $x$  es igual a 0, y es el punto donde la recta corta al eje de ordenadas.
- El valor de **a** es el de la pendiente de la recta, es decir, el grado de inclinación.

En el proceso de validación el objetivo que se quiere cumplir es que la red sea lo más parecida posible a la realidad y que represente de forma precisa el tráfico real de la zona de estudio.

La validación sólo se pudo obtener en el modelo real ya que es del único del que disponemos de los datos de espiras, para el resto de modelos no podemos obtener la validación ya que los datos se obtienen a partir de estimaciones y suposiciones. Los puntos negros representan los datos simulados y los azules los reales.

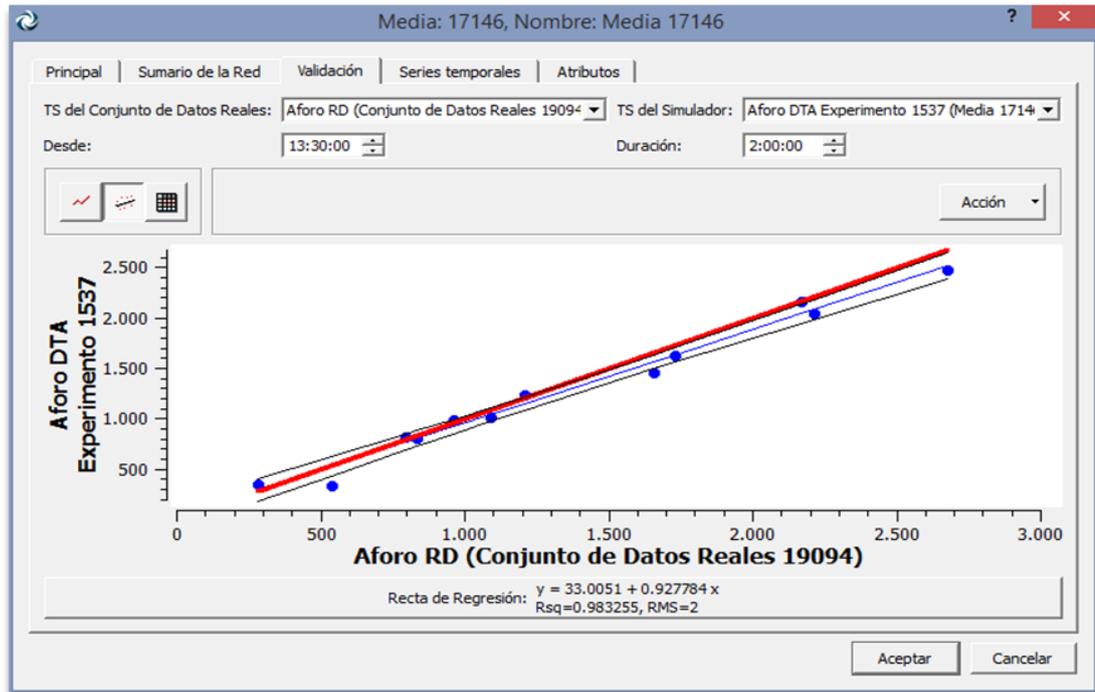


Figura 3.20. Validación de la simulación del modelo real.

Fuente: Software AIMSUN.

El valor de Rsq es prácticamente 1, lo que quiere decir que los valores reales y los simulados no tienen grandes diferencias.

### 3.4. ANÁLISIS DEL MODELO REAL SIMULADO

El análisis de los resultados que se muestran se refiere a la media de varias replicaciones para que los resultados obtenidos sean representativos.

Para evaluar nuestro modelo utilizaremos los siguientes tipos de resultados:

- Mapa de flujo de vehículos.
- Análisis de los parámetros globales a través de tablas y gráficas.
- Características de la red.

### 3.4.1. MAPAS DE FLUJO

- Flujo de vehículos (veh/h):

El programa nos muestra gráficamente el flujo medio de vehículos que hay en cada sección gracias a un código de colores verdes y rojos, dónde los tramos de mayor flujo aparecen en una gama de rojos y los de menor flujo aparecen en verde. En la siguiente figura se muestra el mapa de flujo de vehículos de la Rondilla en hora punta:



*Figura 3.21. Leyenda mapa de flujo (veh/h).*

*Fuente: Software AIMSUN.*



*Figura 3.22. Mapa de flujo de la simulación real (veh/h).*



Como se observa en la figura 3.22. una de las calles con más flujo de vehículos es la Calle Rondilla de Santa Teresa ya que es una de las principales comunicaciones del barrio de la Rondilla con el centro de la ciudad, además también da acceso a la Avenida Salamanca que permite acceder a cualquier otro barrio y que se caracteriza por una gran afluencia. Además en la Calle Rondilla de Santa Teresa se encuentra el Hospital Clínico Universitario por lo que suele haber vehículos en doble fila, dificultando el tráfico.

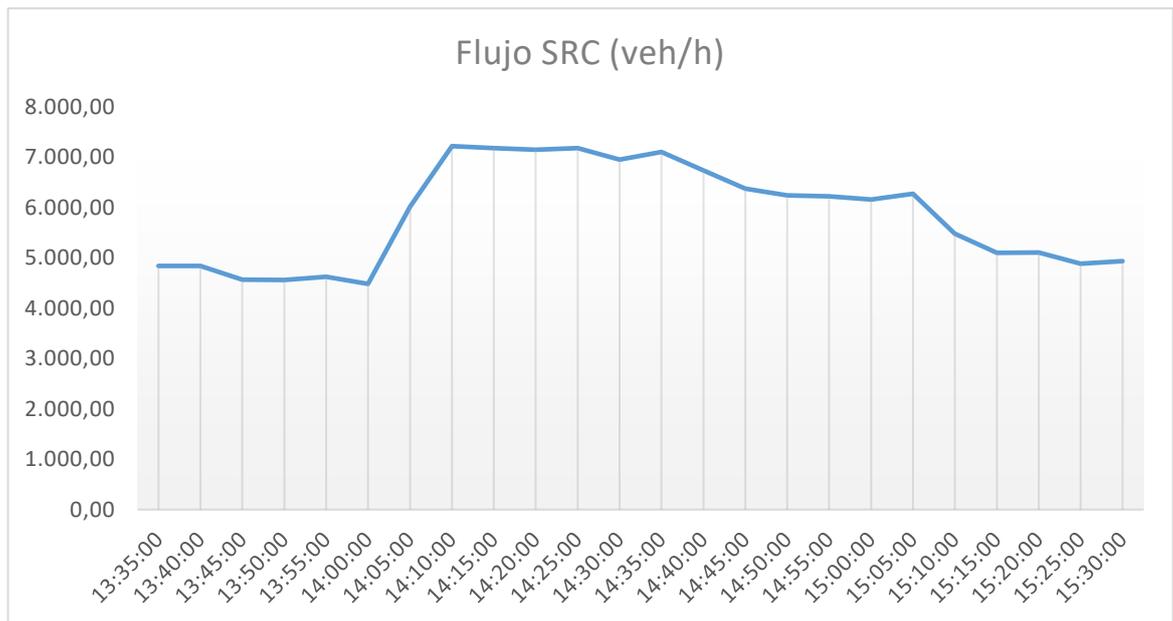
En el caso de la Avenida Palencia se observa que el carril en dirección al centro de la ciudad tendrá mayor flujo de vehículos que el carril en sentido contrario, pero no se superan los 3000 vehículos por hora.

### 3.4.2. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS GLOBALES

Los parámetros que hemos analizado de manera global son los siguientes:

- **Flujo de vehículos (veh/h):**

El programa nos muestra gráficamente el flujo de vehículos que hay en cada calle gracias a un código de colores verdes y rojos, dónde los tramos de mayor flujo aparecen en una gama de rojos y los de menor flujo aparecen en verde. En la siguiente figura se muestra el mapa de flujo de vehículos de la Rondilla en hora punta:

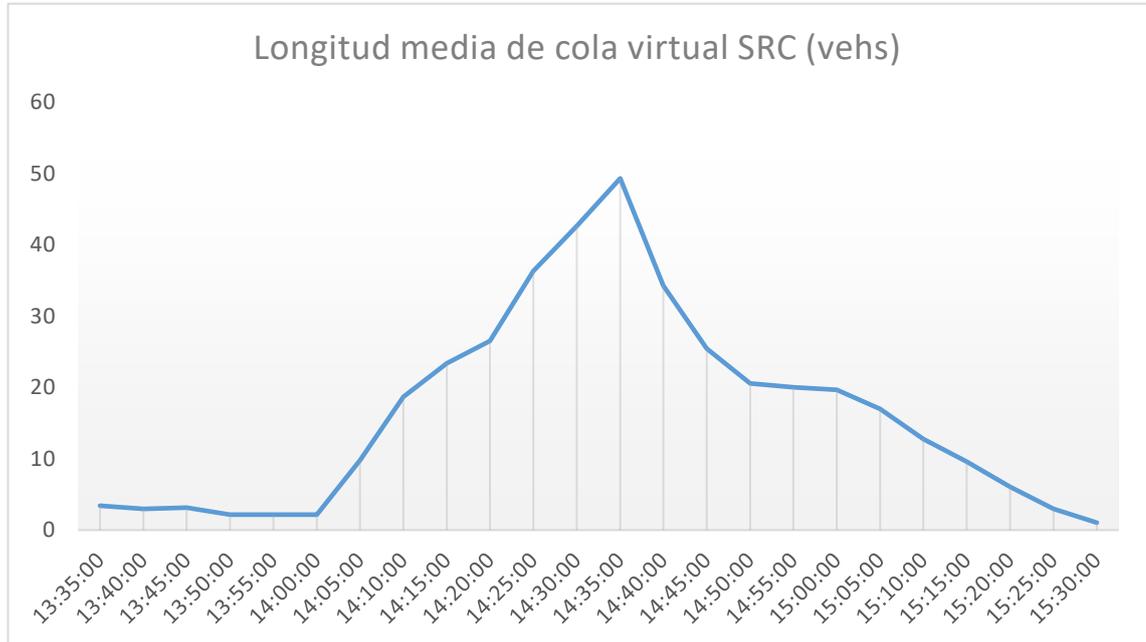


**Figura 3.23.** Flujo de vehículos (veh/h).

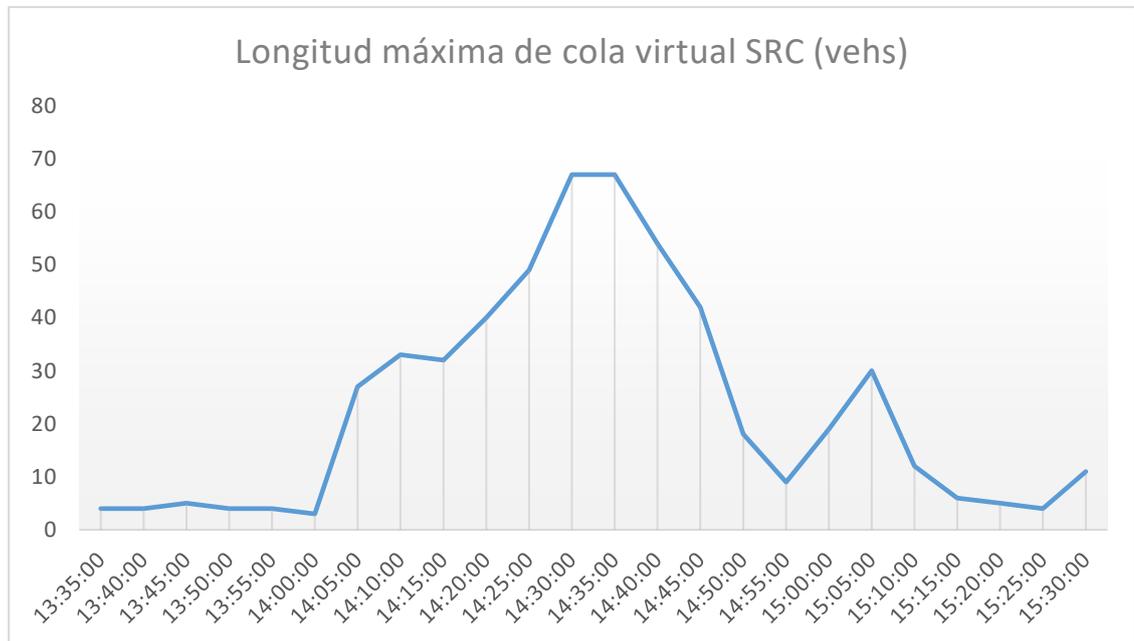
A partir de la gráfica que obtenemos de los datos proporcionados por la simulación del modelo se aprecia que se origina un pico de incremento de flujo que corresponde con la hora punta entre las 14:00 y las 14:30 aproximadamente y disminuyendo después de esta franja horaria.

En cuanto pasan las 14:00 el crecimiento es muy significativo, como era de esperar con los datos que se han obtenido.

- Longitud media de cola (vehs) y longitud máxima de cola virtual (vehs):



**Figura 3.24.** Longitud media de cola virtual (vehs).



**Figura 3.25.** Longitud máxima de cola virtual (vehs).

A medida que aumenta el flujo, el número de vehículos que se encuentran en la cola va aumentando, es decir, el número de vehículos que se tienen que detener va incrementándose a causa de la congestión



de tráfico esperando a que la circulación disminuya. La longitud de cola varía con subidas y bajadas aunque en general los valores irán aumentando durante la hora punta produciéndose el pico más importante entre las 14:30 y las 14:40, posteriormente el tráfico se calma aunque se aprecia como a las 15:05 vuelve a haber otro pico aunque esta vez mucho menos significativo.

- **Tiempo de demora (s/km):**

El tiempo de demora se define como el retraso de un vehículo determinado provocado por la capacidad de la vía, respecto a una situación ideal en la que la única restricción sería la velocidad de la vía.

La expresión que determina el tiempo de demora de un vehículo en realizar un trayecto se define como:

$$TD=TT-TFF$$

donde:

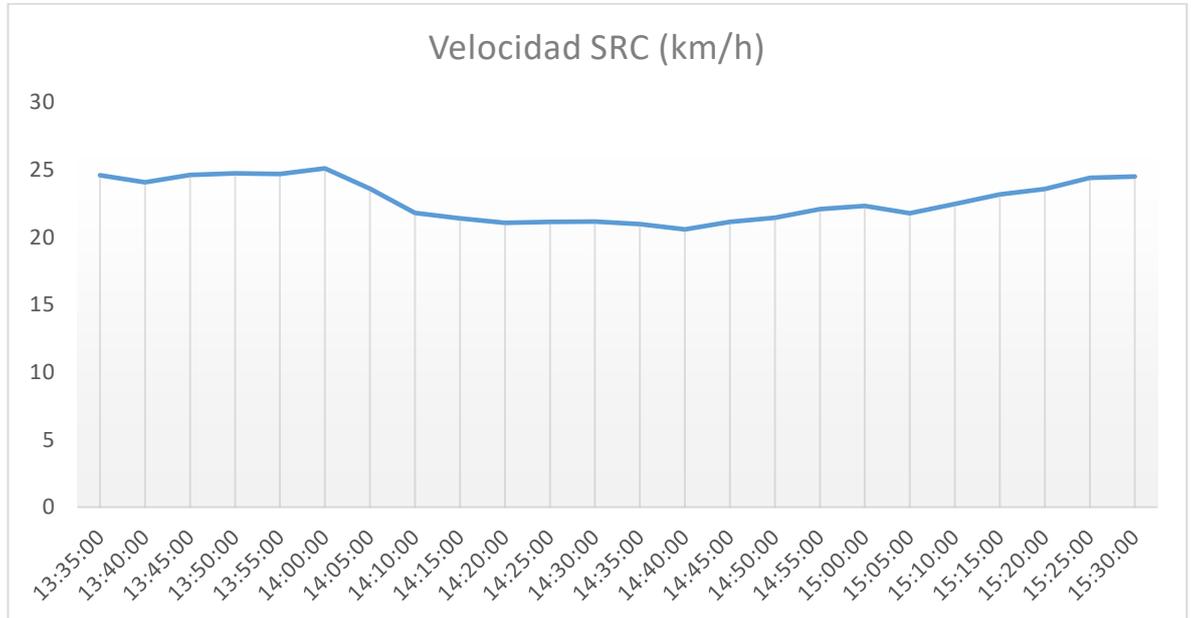
- TD = Tiempo de demora.
- TT (Travel Time) = Es el tiempo medio que tardan todos los vehículos en realizar el trayecto en condiciones normales.
- TFF (Free Flow Time) = Es el tiempo que tardaría el vehículo en realizar el trayecto teniendo como única restricción la velocidad de la vía.



**Figura 3.26.** Tiempo de demora (segundos/km).

Los tiempos de demora comienzan a aumentar durante la hora punta ya que el tiempo que esperan los vehículos es mayor debido al exceso de capacidad en la sección y disminuyen una vez que esta ha pasado al mismo nivel aproximadamente que en el comienzo.

- **Velocidad (km/h):**



**Figura 3.27.** Velocidad (km/h).

La velocidad media de los vehículos de la red disminuye progresivamente durante la circulación en la hora punta alcanzando su valor mínimo sobre las 14:40. Debido al aumento de flujo de vehículos, la longitud de cola y el tiempo de demora, los vehículos se ven obligados a reducir la velocidad media, como se refleja en la gráfica.

- **Tiempo de viaje (s/km):**

El tiempo de viaje define el tiempo medio que tarda un vehículo en realizar su recorrido.

**Figura 3.28.** Tiempo de viaje (s/km).

Como ocurre con el tiempo de demora, al aumentar este, el tiempo de viaje comienza a aumentar también cuando llega la hora punta, los vehículos tardan más en llegar a su destino.



En la siguiente tabla aparecen los valores medios obtenidos en AIMSUN de cada parámetro:

Flujo de vehículos	5.846,10 veh/h
Longitud media de cola	16,34 vehs
Longitud máxima de cola	22,88 vehs
Tiempo de demora	133,68 s/km
Velocidad	22,78 km/h
Tiempo de viaje	203,41 s/km

*Tabla 3.2. Valores medios de los parámetros globales.*

### 3.4.3. CARACTERÍSTICAS DE LA RED

Es conveniente reflejar también el resto de parámetros que se explican a continuación, que nos ofrece AIMSUN y que nos aportarán información adicional para analizar y sacar conclusiones sobre nuestro modelo.

- **Número de paradas y tiempo de parada (s/km):**

El tiempo de parada es el tiempo medio que cada vehículo se mantiene parado a lo largo del recorrido de su camino, se expresa en s/km; el número de paradas hace referencia al número medio de paradas que cada vehículo realiza durante el recorrido de su trayecto.



**Figura 3.29.** Número de paradas.

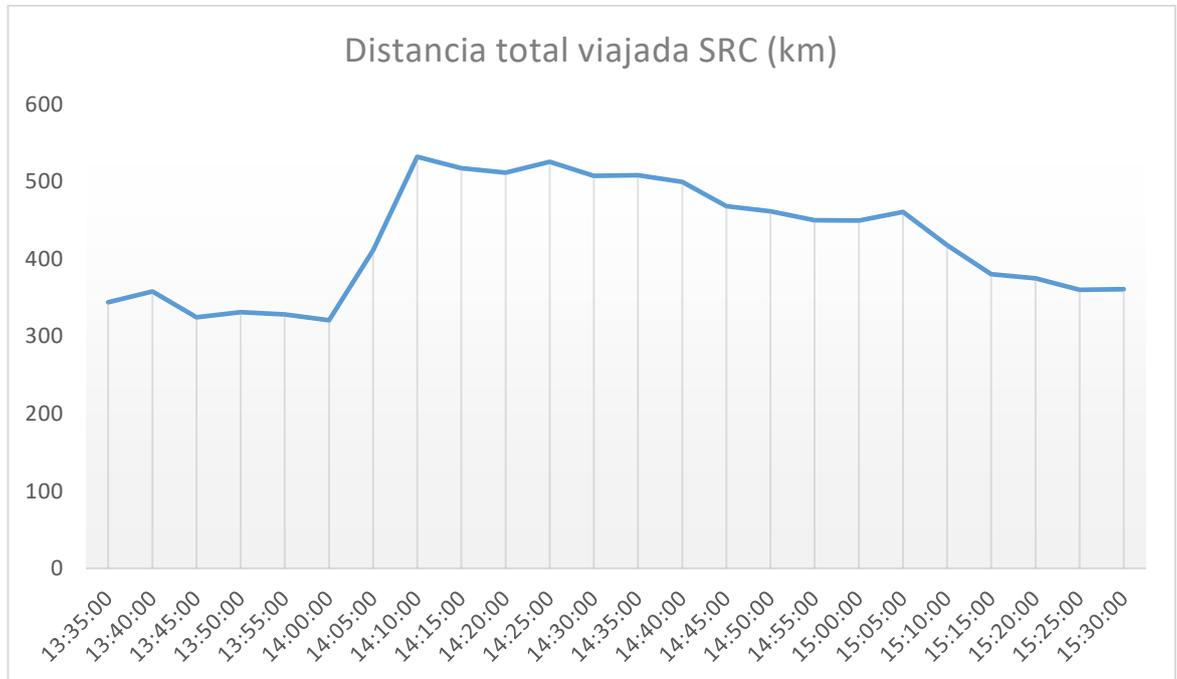


**Figura 3.30.** Tiempo de parada (s/km).

De nuevo observamos cómo se corresponden el número de paradas y el tiempo de parada en cada una de ellas, produciéndose los valores más elevados en el periodo de hora punta.

- **Distancia total viajada (km):**

Se define como la suma total de las distancias que recorre cada vehículo desde su origen hasta su destino expresada en km.

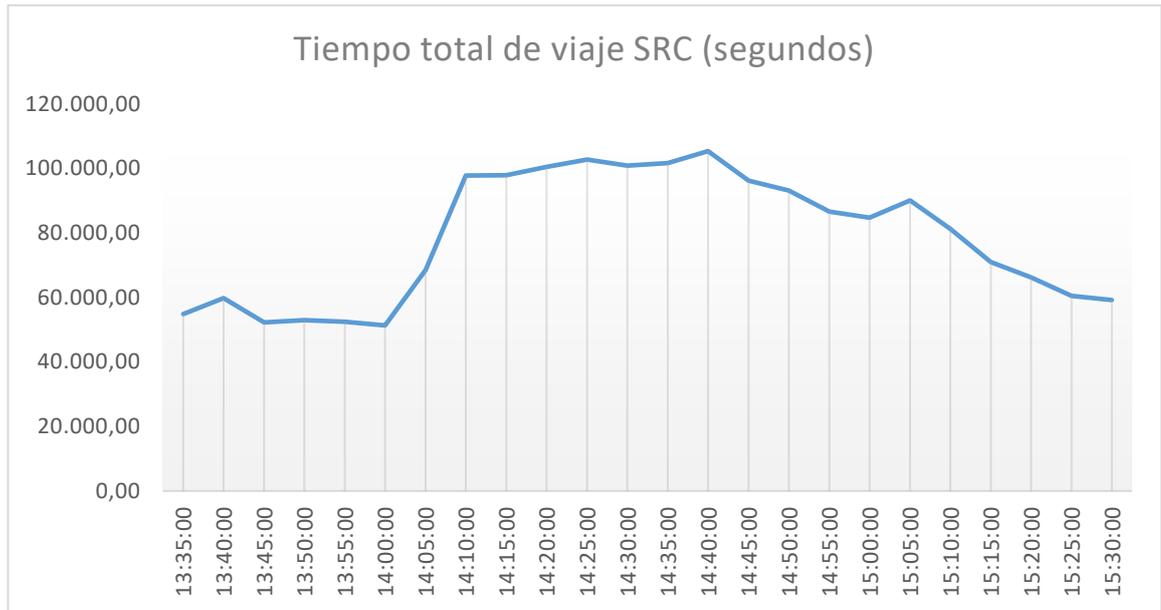


**Figura 3.31.** Distancia total viajada (km).

En el momento en el que más vehículos circulan por la red se incrementan las distancias que estos recorren. La distancia total viajada será mayor cuanto mayor sea la cantidad de vehículos.

- **Tiempo total de viaje:**

Representa la suma total de todos los tiempos que cada vehículo de la demanda tarda en realizar su recorrido.



**Figura 3.32.** Tiempo total de viaje (segundos).

En la siguiente tabla aparecen los valores medios obtenidos en AIMSUN de cada parámetro anterior:

Número de paradas	3,6
Tiempo de parada	112,23 s
Distancia total viajada	425,28 km
Tiempo total de viaje	78.673,86 s

**Tabla 3.3.** Valores medios de los parámetros de la red.

### 3.5. PROPUESTAS DE NUEVOS MODELOS DE TRÁFICO

A continuación se va a realizar un estudio de las previsiones del tráfico en la Rondilla después de la apertura de un nuevo carril en el año 2021 destinado al tráfico de los vehículos de movilidad personal y bicicletas. Como se verá la

apertura inicial de este carril tendrá una influencia prácticamente nula en el tráfico, pero en el último modelo considerando una estabilización de la situación y un incremento exponencial como el que hay hoy en día de los vehículos de movilidad personal provocará un cambio más significativo en el tráfico.

Se han realizado tres modelos, que se compararán entre ellos y con el modelo real anterior con el objetivo de estudiar cómo afecta al tráfico cada uno de ellos. Los modelos propuestos son los siguientes:

- **Situación del año objetivo sin carril adicional:** Este modelo estudia el crecimiento del tráfico para comprobar la diferencia que hay al añadir el carril adicional en el siguiente modelo.
- **Situación del año objetivo con carril adicional:** Añadimos el carril adicional para los vehículos de movilidad personal y bicicletas a la simulación en la acera del sentido de circulación hacia el centro de la ciudad a lo largo de toda la Avenida Palencia. Sólo se incluye en un lado ya que la otra acera ya dispone de un carril por el que pueden circular estos vehículos.
- **Aumento de los VMP y disminución de vehículos a motor:** Se modifican todas las matrices de O/D, disminuyendo los viajes de los coches y aumentando los viajes de los VMP.

### 3.5.1. COMPARACIÓN SITUACIÓN DEL AÑO OBJETIVO SIN CARRIL ADICIONAL Y SITUACIÓN DEL AÑO OBJETIVO CON CARRIL ADICIONAL DEL VEHÍCULO TIPO COCHE

El modelo en el año objetivo sin carril adicional estudia el crecimiento de tráfico que se producirá en el año 2021, ya que será el año objetivo de nuestro



estudio, en el que se produciría la creación del nuevo carril adicional para los VMP y los ciclistas y que estudiamos en el siguiente modelo.

Para realizar este modelo se ha utilizado un método no analítico, en concreto el método uniforme de los factores de crecimiento que se ha explicado anteriormente, el factor utilizado para el cálculo de la nueva matriz O/D coincide con el crecimiento del parque de vehículos: **1,05**.

Aplicando la fórmula gracias a la facilidad que permite AIMSUN de realizar operaciones se calculan automáticamente las nuevas matrices.

El **modelo del año objetivo con el carril** adicional estudia, al igual que el anterior, el crecimiento del tráfico en 2021 pero teniendo en cuenta también el crecimiento que se producirá de los VMP y la necesidad de crear un espacio para su circulación. En este caso se ha creado un carril adicional por el que puedan circular estos nuevos vehículos. Este carril estará destinado también para la circulación de las bicicletas.

La matriz O/D para los VMP se realizó a partir de las ventas que ha habido hasta ahora de este tipo de vehículos

El estudio por separado de estos modelos no tiene sentido, por tanto se hace de manera conjunta pudiendo comparar uno con otro y viendo los cambios que se producen en el tráfico y cómo le afecta la implantación del nuevo carril.

Los parámetros que estudiaremos se basarán en los mismos tipos de resultados que hemos utilizado en el modelo anterior.

### 3.5.1.1. MAPAS DE FLUJO

- Flujo de vehículos (veh/h):



Figura 3.33. Modelo sin carril de los coches.



Figura 3.34. Modelo con carril de los coches.

Como vemos los mapas de flujo son muy similares, algunos de los cambios que se producen también puede deberse a que la media se calcula a partir de las replicaciones y estas se realizan aleatoriamente cada vez que se simulan. Nunca se producen simulaciones idénticas.

En la Calle de Santa Clara el flujo pasa de ser naranja a naranja oscuro, es decir, pasa de tener un flujo de vehículos medio de entre 2.000 y 3.000 vehículos por hora a tener entre 3.000 y 4.000. La razón de este y el resto de pequeños cambios, se debe a que al introducir un nuevo carril también se ha tenido que introducir un nuevo plan semafórico en todas las intersecciones a las que afecta este carril. Lo que provoca esto es la aparición de una nueva fase que los vehículos están obligados a realizar y que influirá levemente en el flujo y en otros parámetros.

### 3.5.1.2. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS GLOBALES

- Flujo de vehículos (veh/h):

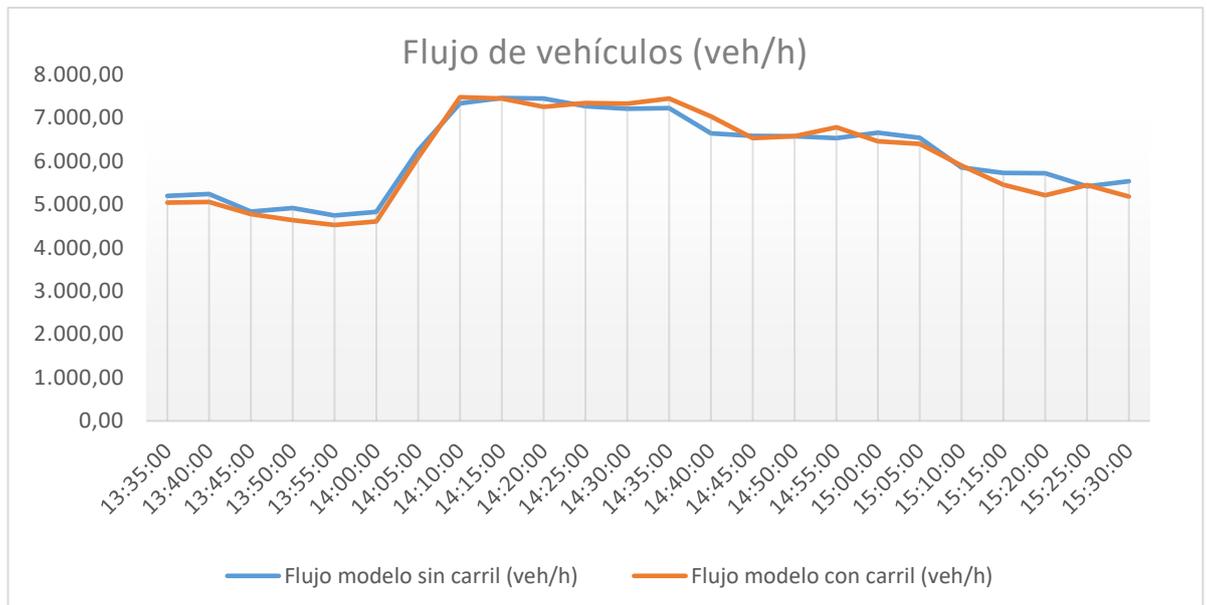


Figura 3.35. Comparación flujo de vehículos (veh/h) de los coches.

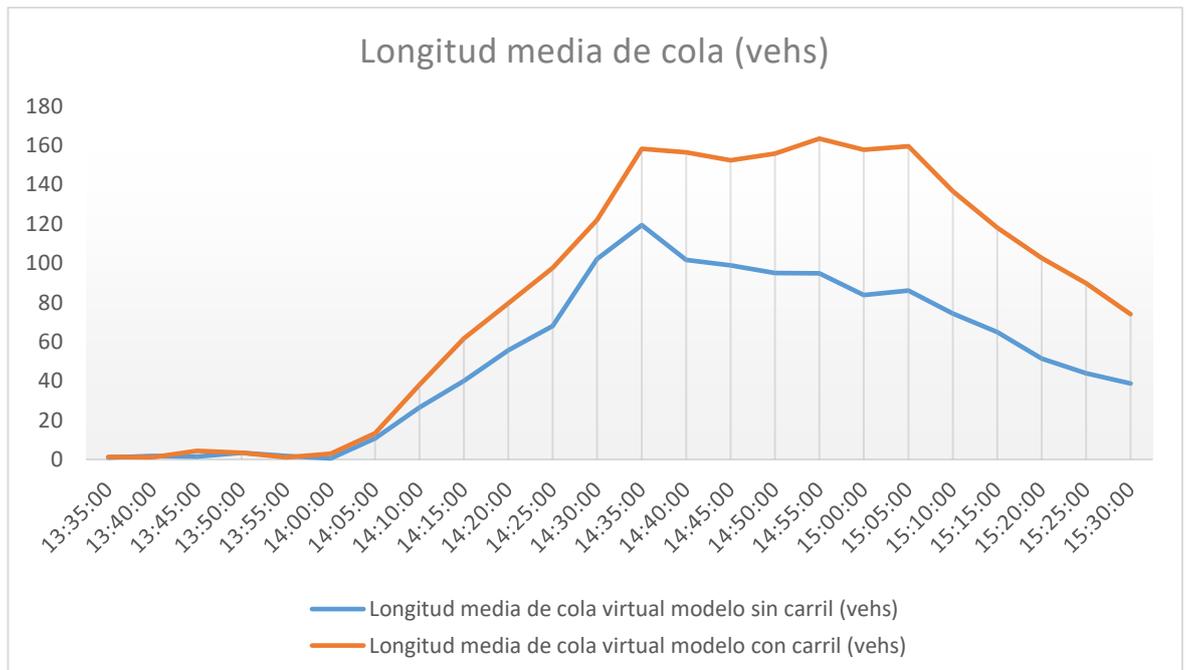
En la figura 3.35. observamos que el flujo es prácticamente similar en los dos modelos y apenas hay importantes variaciones que la creación del carril adicional no afecta a este parámetro como era de esperar, ya que la demanda de tráfico es la misma en ambos modelos.

Flujo de vehículos	veh/h
Modelo sin carril adicional	6.154,90 veh/h
Modelo con carril adicional	6.082,00 veh/h

**Tabla 3.4.** Comparación valores medios de flujo de vehículos de los coches.

Los valores medios muestran la pequeña diferencia que hay entre ambas situaciones, favoreciendo a la propuesta con el carril adicional, pero como ya se ha comentado antes esto puede deberse a que los resultados se obtienen de forma aleatoria.

- Longitud media de cola virtual (veh):



**Figura 3.36.** Comparación longitud media de cola virtual (vehs) de los coches.

Los resultados obtenidos de la longitud media de cola son bastante más diferentes. Llama la atención que los cambios son muy parecidos, es decir, los picos se producen en los mismos periodos para ambos modelos pero en cada uno en una franja distinta de valores.

Los cambios no se empiezan a apreciar hasta las 14:05, hasta esa hora los valores son prácticamente cero para los dos modelos, y a partir de esa hora la longitud de cola para el modelo con carril aumenta con una pendiente mayor que la del modelo sin carril.

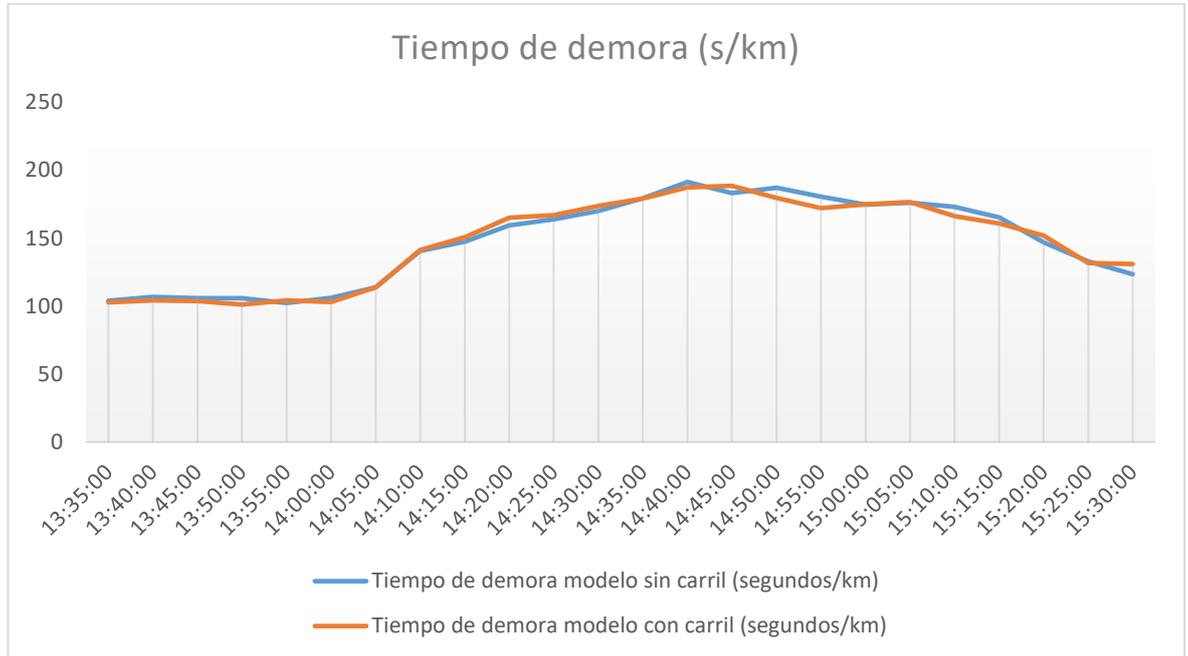
En el modelo con el carril adicional vemos que en el primer pico que se produce a las 14:40 no disminuye tanto como en el otro modelo, pero los demás son iguales.

Longitud media de cola	vehs
Modelo sin carril adicional	52,75 vehs
Modelo con carril adicional	85,47 vehs

**Tabla 3.5.** Comparación valores medios de longitud media de cola virtual de los coches.

Las colas de vehículos se deben a la acumulación de vehículos, normalmente en las intersecciones semafóricas, por tanto, como se ha comentado anteriormente, al añadir una nueva fase semafórica para poder combinar el modelo con el carril adicional los vehículos tendrán que esperar más tiempo en los semáforos, provocando mayores colas que en modelo sin carril.

- Tiempo de demora (s/km):



**Figura 3.37.** Comparación tiempo de demora (s/km) de los coches.

Acorde con el resto de conclusiones obtenidas anteriormente, el tiempo de demora es mucho más parecido que el resto de parámetros para los dos modelos.

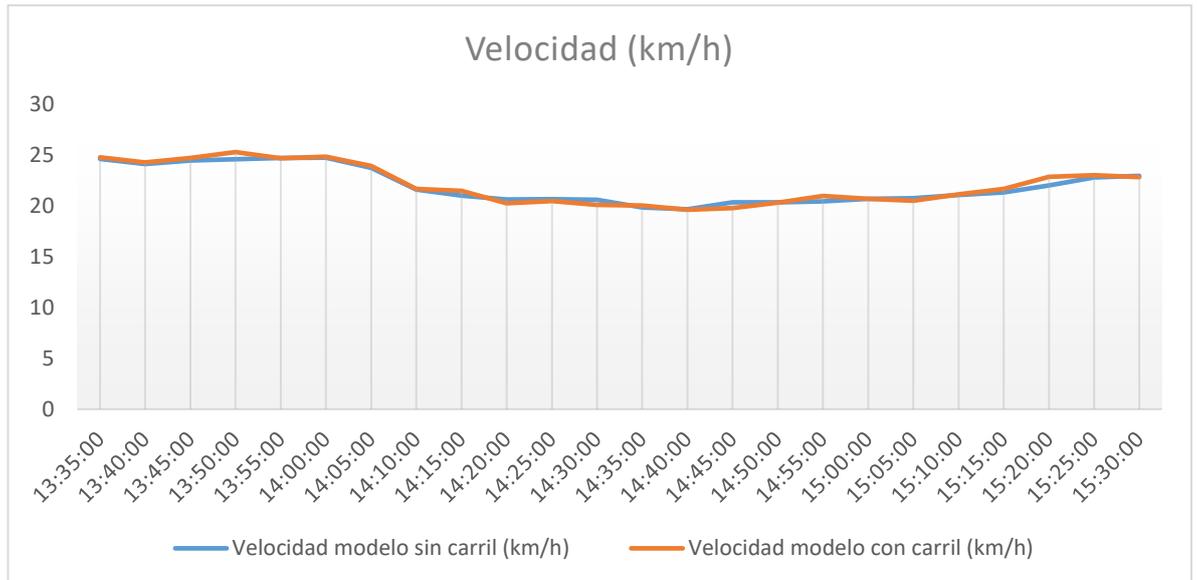
El tiempo de demora permanece constante ya que la capacidad de las secciones no se ha modificado y el retraso de los vehículos es el mismo.

Tiempo de demora	s/km
Modelo sin carril adicional	147,54 s/km
Modelo con carril adicional	147,15 s/km

**Tabla 3.6.** Comparación valores medios de tiempo de demora de los coches.

Las diferencias entre los valores de los dos modelos apenas apreciables.

- Velocidad (km/h):



**Figura 3.38.** Comparación velocidad (km/h) de los coches.

En esta gráfica seguimos viendo lo mismo que en las anteriores, valores iguales para ambos modelos.

Velocidad	km/h
Modelo sin carril adicional	21,97 km/h
Modelo con carril adicional	22,06 km/h

**Tabla 3.7.** Comparación valores medios de velocidad de los coches.

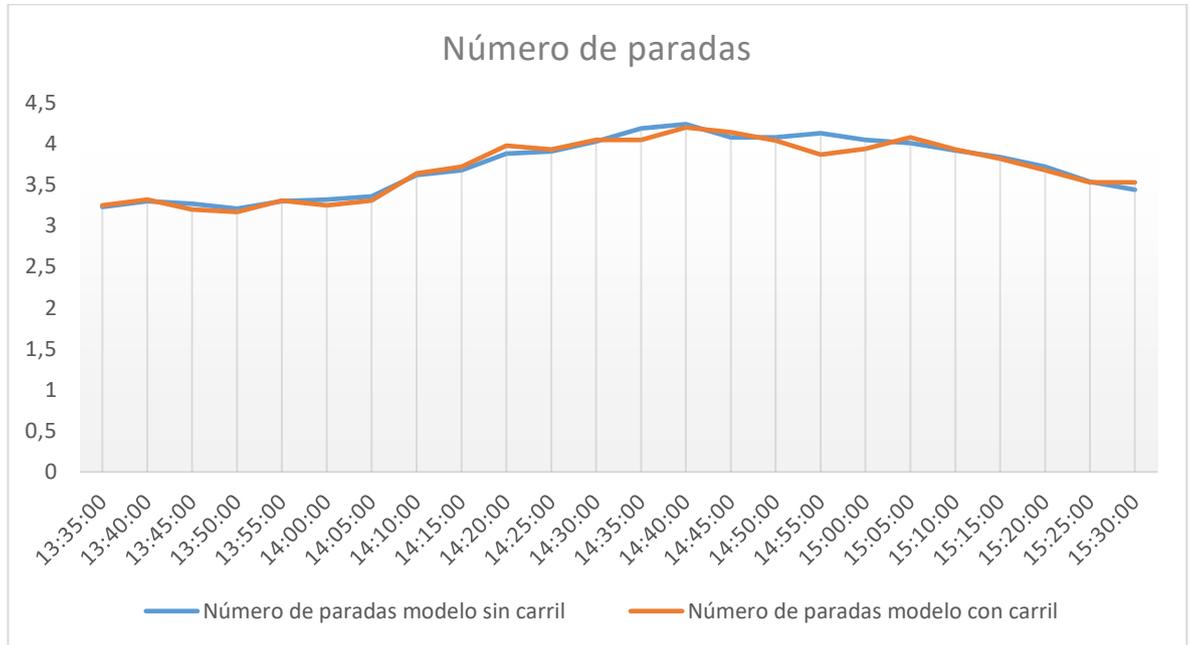
### 3.5.1.3. CARACTERÍSTICAS DE LA RED

Es conveniente reflejar también el resto de parámetros que se explican a continuación, que nos ofrece AIMSUN y que nos aportarán información adicional para analizar y sacar conclusiones sobre nuestro modelo.

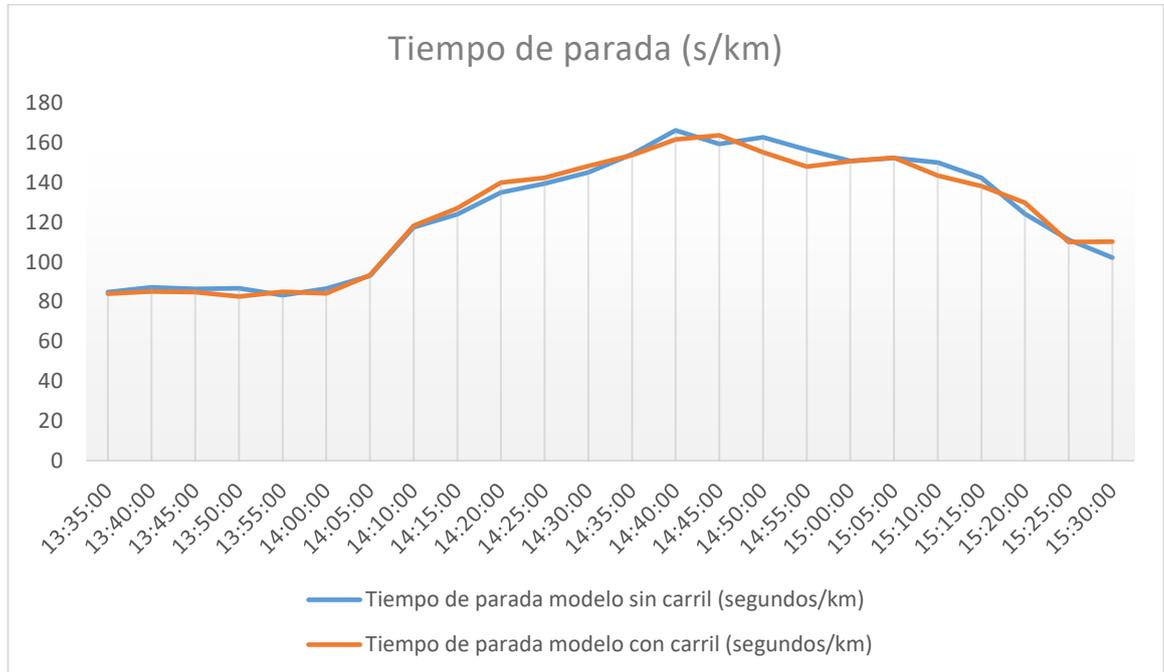
- **Número de paradas y tiempo de parada (s/km):**

El tiempo de parada es el tiempo medio que cada vehículo se mantiene parado a lo largo del recorrido de su camino, se expresa en

s/km; el número de paradas hace referencia al número medio de paradas que cada vehículo realiza durante el recorrido de su trayecto.



**Figura 3.39.** Comparación número de paradas de los coches.



**Figura 3.40.** Comparación tiempo de parada (s/km) de los coches.

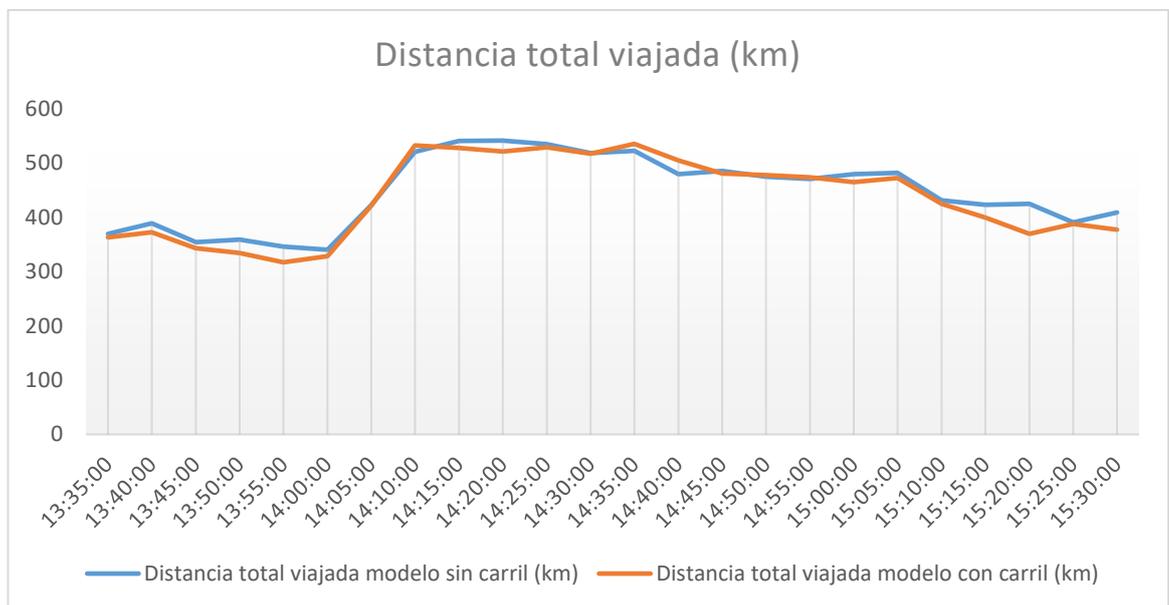
Se ve como el número de paradas y el tiempo de parada también coincide en los dos modelos y que no se aprecia ninguna diferencia con la que podamos comparar las dos situaciones.

	Número de paradas	Tiempo de parada
<b>Modelo sin carril adicional</b>	3,72	125,08 s/km
<b>Modelo con carril adicional</b>	3,71	124,68 s/km

**Tabla 3.8.** Comparación valores medios de número de paradas y tiempo de parada de los coches.

- **Distancia total viajada (km):**

Se define como la suma total de las distancias que recorre cada vehículo desde su origen hasta su destino expresada en km.



**Figura 3.41.** Comparación distancia total viajada (km) de los coches.

Como se ha comentado en los casos anteriores, al no cambiar la demanda de tráfico a través de la matriz de O/D de un modelo a otro los resultados serán prácticamente idénticos.

Distancia total viajada	km
Modelo sin carril adicional	446,2 km
Modelo con carril adicional	436,43 km/h

*Tabla 3.9. Comparación valores medios de velocidad de los coches.*

Como se ve en la gráfica, se confirma que en ambos modelos el resultado es el mismo, con una diferencia de apenas 10 km entre cada uno.

### **3.5.2. COMPARACIÓN SITUACIÓN DEL AÑO OBJETIVO CON CARRIL ADICIONAL Y AUMENTO DE LOS VMP Y DISMINUCIÓN DE VEHÍCULOS A MOTOR DEL VEHÍCULO TIPO COCHE**

Una vez estudiado el modelo con el carril adicional sin haber modificado la demanda de tráfico de la matriz O/D para los coches y habiendo creado una nueva matriz O/D para los VMP, se plantea una nueva situación debido al gran crecimiento que ha habido de estos vehículos en el último año.

En el último modelo que se va a estudiar se plantea una situación en la que una pequeña parte de la demanda de tráfico de los coches pase a formar parte de la demanda de tráfico de los VMP. Por tanto, aumentará la matriz O/D de los VMP y esa parte que se aumenta pasa a disminuir de la matriz O/D de los coches.

A nivel nacional el crecimiento de los VMP en los dos últimos años ha sido de un 42,34%, entre 5000 y 7000 patinetes y la previsión para 2019 es que las ventas se multipliquen por 4 y llegar a los 100.000.

Para realizar este modelo, como en el caso anterior, se ha utilizado el método uniforme de los factores de crecimiento, el factor utilizado para el

cálculo de la nueva matriz O/D de VMP ha sido de **1,19**. Los viajes que han pasado a formar parte de esta matriz se han disminuido en la de coches. En cada viaje que realiza un coche se ha considerado que lo hace de manera individual ya que en los VMP sólo viaja una persona.

### 3.5.2.1. MAPAS DE FLUJO

- Flujo de vehículos a motor (veh/h):



*Figura 3.42. Mapa de flujo modelo con carril de los coches.*



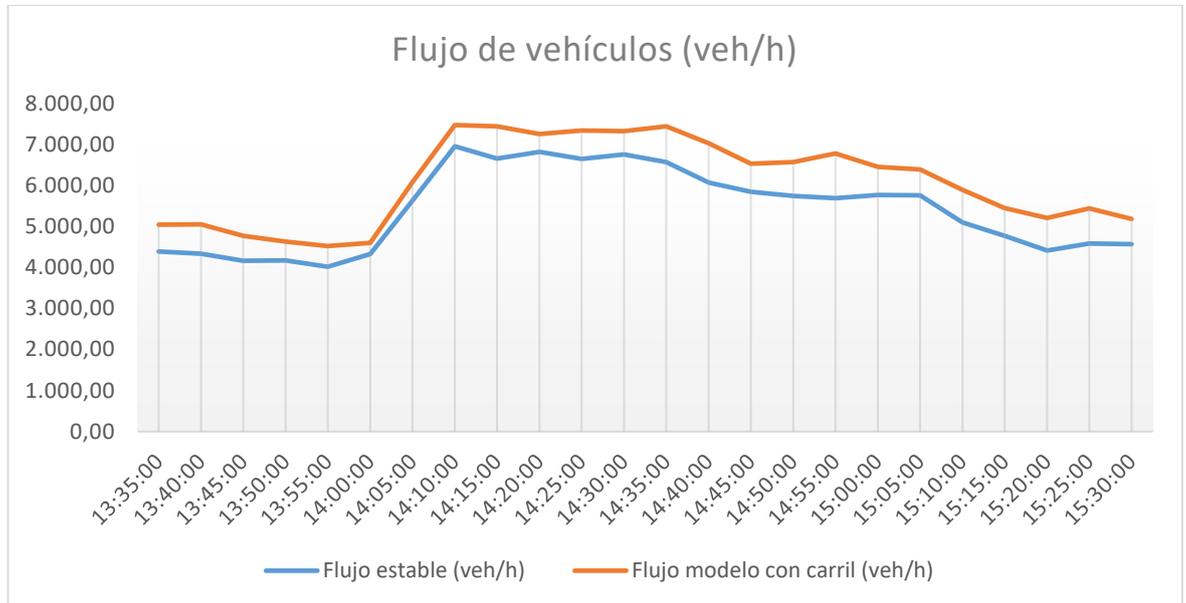
**Figura 3.43.** Mapa de flujo modelo estable de los coches.

Se comprueba como el volumen de tráfico de prácticamente toda la red es mucho menor en el nuevo modelo. La congestión que se producía en la Calle Santa Clara en el modelo con el carril adicional sin cambiar las demandas de tráfico en este nuevo modelo disminuye bastante y en general disminuye el flujo como era de esperar ya que la demanda de tráfico ha disminuido.

El cambio se aprecia sobretodo en la Avenida Palencia donde el flujo durante toda la sección aparece representado de color amarillo.

### 3.5.2.2. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS GLOBALES

- Flujo de vehículos (veh/h):



**Figura 3.44.** Comparación flujo de vehículos (veh/h) de los coches.

Con el cambio para la simulación del nuevo modelo vemos que el flujo de vehículos disminuye al estabilizarse la situación y por tanto estamos tendiendo a una mejora de la demanda de tráfico con menos flujo de vehículos y sus consecuencias.

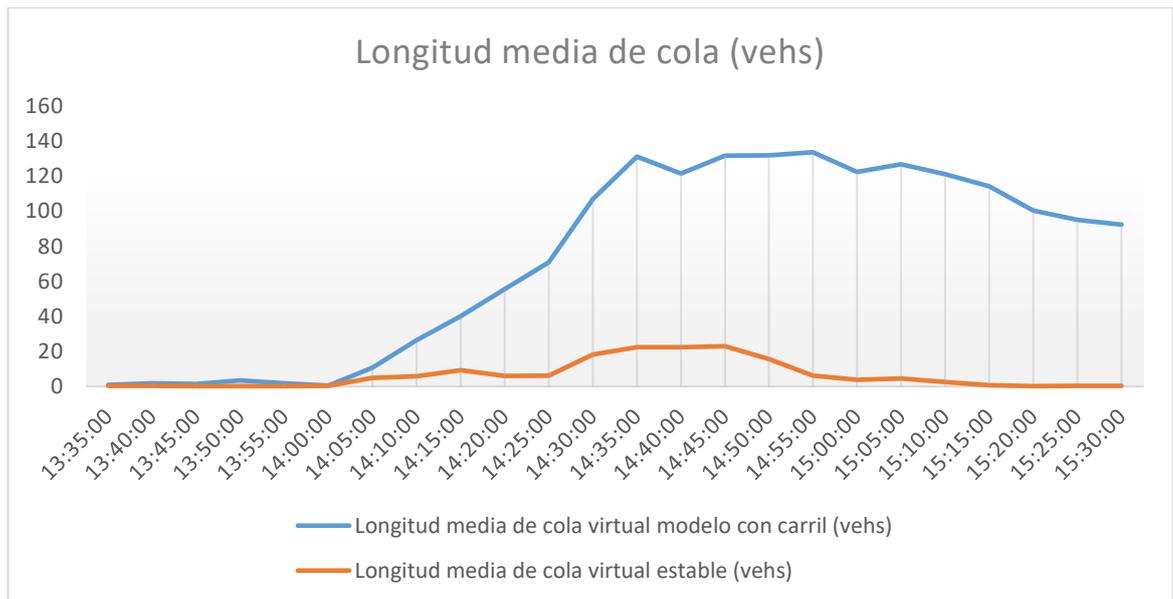
Flujo de vehículos	veh/h
Modelo con carril adicional	6.055,7 veh/h
Modelo estable	5.408,4 veh/h

**Tabla 3.10.** Comparación valores medios de flujo de vehículos de los coches.

Los valores medios corroboran esa disminución considerable de casi 600 vehículos por hora de media.

A pesar de la circulación más fluida de la red del nuevo modelo evitando la congestión en las secciones, sobre todo de la hora punta, los vehículos que antes realizaban esas rutas ahora lo harán igual pero en otro tipo de vehículo. Lo que se consigue así es dividir el flujo de vehículos de la demanda de tráfico total.

- **Longitud media de cola (veh):**



**Figura 3.45.** Comparación longitud media de cola virtual (vehs) de los coches.

La longitud media de cola va a ser uno de los parámetros más representativos y fiables para realizar las comparaciones entre los modelos.

Se ve que este parámetro queda claramente reducido en el modelo estable y se mantiene muy constante durante todos los periodos de la simulación, aunque aumenta muy ligeramente sobre las 14:30 coincidiendo con la hora punta.

Esto se debe a que la demanda de tráfico de los coches se ha disminuido y la cantidad de estos que se mantienen parados en las intersecciones es mucho menor permitiendo así un flujo mucho más fluido que en el modelo sin cambios de demanda.

Longitud media de cola	vehs
Modelo con carril adicional	72,66 vehs
Modelo estable	6,44 vehs

**Tabla 3.11.** Comparación valores medios de longitud media de cola virtual de los coches.

Como se refleja en los valores medios se produce un gran cambio. La Avenida Palencia es una calle con una gran cantidad de intersecciones, lo que provoca que haya muchas paradas de vehículos. Con la creación del nuevo carril y la posibilidad de que los viajes realizados en coche disminuyan los coches parados en los semáforos ya no serán tantos como antes.

- Tiempo de demora (s/km):



**Figura 3.46.** Comparación tiempo de demora (s/km) de los coches.

Se observa como en los tiempos de demora, este parámetro es inferior al del modelo comparado, especialmente cuando se inicia la hora punta sobre las 14:10, aunque esto ocurrirá también en el resto de parámetros ya que es el periodo de tiempo más conflictivo de todos y por esa razón lo estudiamos.

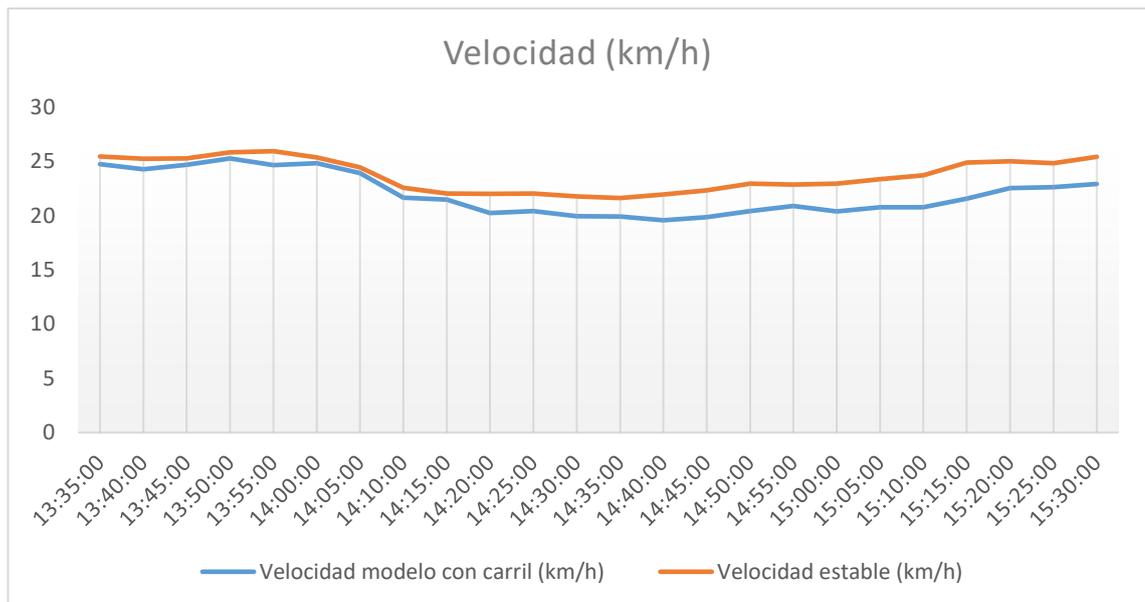
Llama la atención que aunque la disminución de la longitud media de cola haya sido muy notable en el caso del tiempo de demora la diferencia no lo es tanto. Esto puede deberse a que a pesar de que hay menos congestión en las secciones de la red, los vehículos están obligados de la misma manera a parar en los semáforos, yendo en coche o yendo en VMP.

Tiempo de demora	s/km
Modelo con carril adicional	148,47 s/km
Modelo estable	119,28 s/km

**Tabla 3.12.** Comparación valores medios de tiempo de demora de los coches.

La diferencia en los valores medios del tiempo de demora comparado con los de la longitud de cola es muy poco considerable. La longitud de cola cambia 10 veces más.

- **Velocidad (km/h):**



**Figura 3.47.** Comparación velocidad (km/h) de los coches.

El último parámetro a analizar será la velocidad de las redes, mayor a lo largo de toda la simulación para el modelo estable. Este hecho es lógico ya que como hemos visto con el resto de parámetros hay más congestión en el modelo sin cambios de demanda y por eso los vehículos se ven obligados a disminuir la velocidad.

Los picos que se producen son exactamente los mismos ya que, aunque puedan circular a más velocidad las paradas que harán serán las mismas en ambos modelos.

Velocidad	km/h
Modelo con carril adicional	22,01 km/h
Modelo estable	23,74 km/h

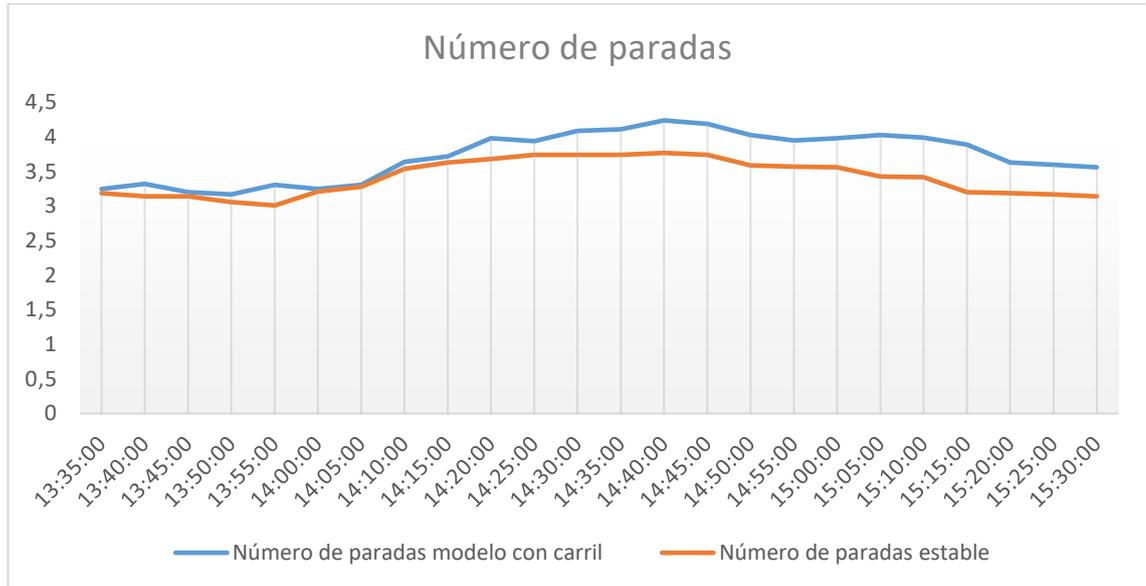
**Tabla 3.13.** Comparación valores medios de velocidad de los coches.

Ambos valores son prácticamente iguales, pero sí que se puede asegurar que la media será mayor en el último modelo. La velocidad tampoco es un parámetro que se pueda juzgar de forma positiva o negativa si aumenta o disminuye ya que un aumento de velocidad no significa una mejor circulación.

### 3.5.2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA RED

Es conveniente reflejar también el resto de parámetros que se explican a continuación, que nos ofrece AIMSUN y que nos aportarán información adicional para analizar y sacar conclusiones sobre nuestro modelo.

- Número de paradas y tiempo de parada (s/km):



**Figura 3.48.** Comparación número de paradas de los coches.



**Figura 3.49.** Comparación tiempo de parada (s/km) de los coches.

En las gráficas comparativas el tiempo de parada y el número de paradas se ve que en el modelo estable se ve reducido notablemente el tiempo de parada pero la reducción no es tan notable en el número de paradas. Esto es debido a que la demanda se ha reducido, la longitud

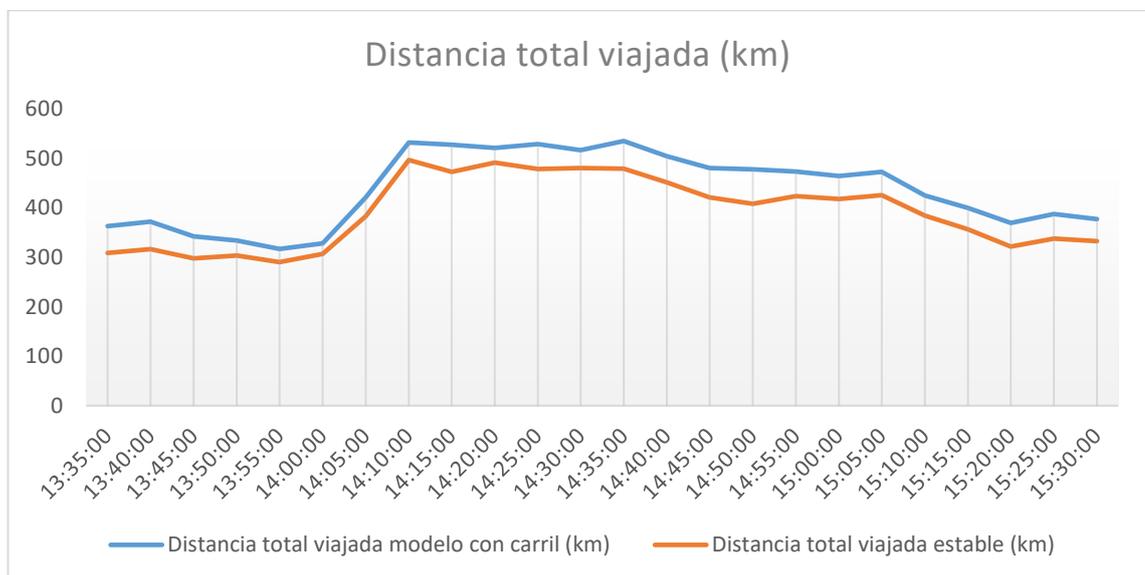
se ha reducido y los coches circulan de manera más fluida, pero aun así van a tener que detenerse y por tanto hacer casi las mismas paradas.

	Número de paradas	Tiempo de parada
Modelo con carril adicional	3,72	126 s/km
Modelo estable	3,41	99,02 s/km

**Tabla 3.14.** Comparación valores medios de número de paradas y tiempo de parada de los coches.

Diferencia mucho más significativa en los valores medios del tiempo de parada y no tanto para los valores del número de paradas aunque sí que se produzca un cambio.

- **Distancia total viajada (km):**



**Figura 3.50.** Comparación distancia total viajada (km) de los coches.

Hay una pequeña mejora también en la distancia total viajada. Al haber menos congestión y tiempos de demora habrá menos distancia

total viajada. Pero el estudio de este parámetro es similar al del flujo de vehículos y vemos que sus cambios son muy similares.

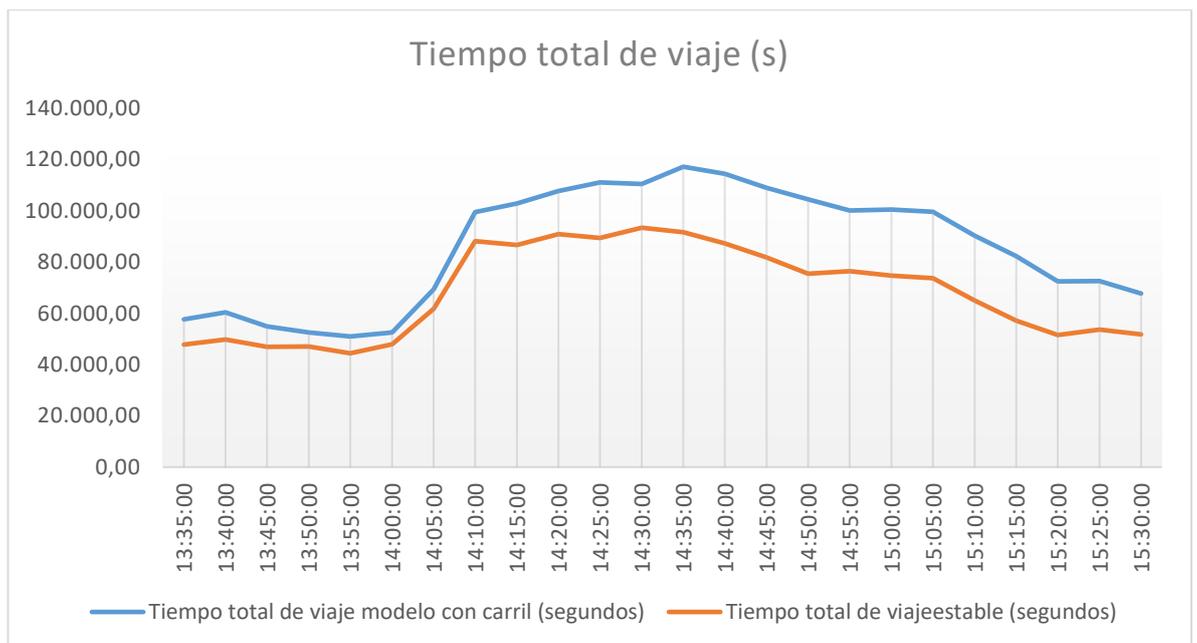
Distancia total viajada	km
Modelo con carril adicional	436,43 km
Modelo estable	391,20 km

**Tabla 3.15.** Comparación valores medios de velocidad de los coches.

Como se ve en la gráfica, el valor medio también disminuye. La mejora de los tiempos de demora provoca que el recorrido se realiza en el nuevo modelo sea menor.

- **Tiempo total de viaje (s):**

El tiempo total que están los vehículos dentro de la red correspondiente a cada cinco minutos se representa con la variable de tiempo total de viaje.



**Figura 3.51.** Comparación tiempo total de viaje (km) de los coches.

Esta característica la vamos a estudiar en esta comparación ya que también aporta información. Como vemos en la gráfica el tiempo total de viaje es menor en la situación del modelo estable pero los picos se producen en las mismas zonas horarias.

Tiempo total de viaje	segundos
Modelo con carril adicional	85.854,85 s
Modelo estable	68.106,17 s

**Tabla 3.16.** Comparación valores medios de tiempo total de viaje de los coches.

Con los valores medios podemos ver que los vehículos del modelo con el carril adicional y sin cambios en la demanda permanecen cinco horas más en la red que los vehículos del nuevo modelo con la situación estable.

### 3.5.3. COMPARACIÓN DEL TRÁFICO DE LOS VEHÍCULOS DE MOVILIDAD PERSONAL EN EL MODELO CON CARRIL ADICIONAL Y EN EL MODELO ESTABLE DEL VEHICULO TIPO PATINETE

Este último análisis comparativo es de los dos mismos modelos que los del punto anterior pero en vez de comparar los coches se comparan los VMP. Como se ha comentado anteriormente, la situación del modelo estable estudia una disminución de la demanda de tráfico de los coches y esa disminución de demanda se añadirá a la demanda de tráfico de los VMP.

Al facilitar los desplazamientos y la circulación de los VMP y creando una normativa que regule su tráfico, habrá personas que decidirán cambiar su modo de transporte por uno mucho más económico, sencillo e incluso, dependiendo del trayecto, más rápido.



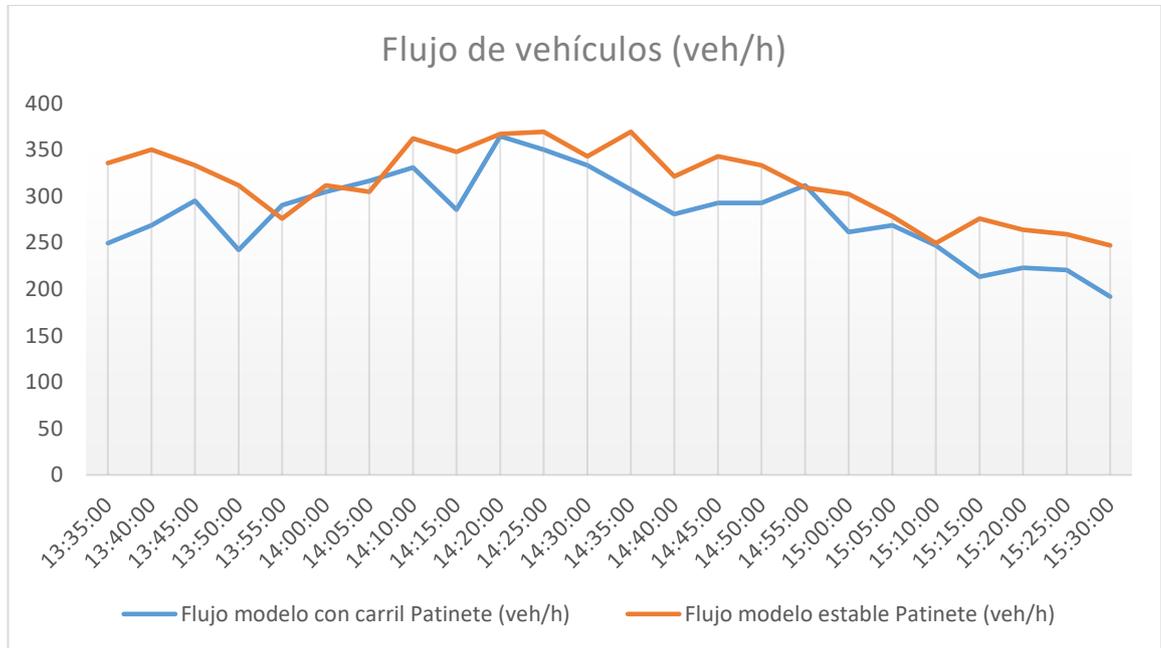


**Figura 3.53.** Mapa de flujo modelo estable de los VMP.

El cambio de volumen de tráfico para el nuevo carril de circulación de VMP no se aprecia en el mapa de flujo de vehículos ya que los colores en los que aparece se mantienen igual. Esto se puede deber a que, aunque haya aumentado el flujo de estos vehículos, la escala de colores a la que pertenece el valor del modelo con carril y el valor del modelo estable siga siendo la misma, en este caso al ser de color amarillo está en una escala de 500-1000 vehículos por hora en esa sección concreta.

### 3.5.3.2. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS GLOBALES

- Flujo de vehículos (veh/h):



**Figura 3.54.** Comparación flujo de vehículos (veh/h) de los VMP.

Las gráficas del flujo de vehículos cambian mucho de una simulación a otra. En la mayoría de los periodos horarios que representamos el flujo de vehículos del modelo estable se mantiene por encima que el del modelo con carril, pero llaman la atención dos puntos en los que el flujo del modelo estable se sitúa por debajo, a las 13:55 y a las 14:50. Además en algún otro periodo el flujo prácticamente coincide.

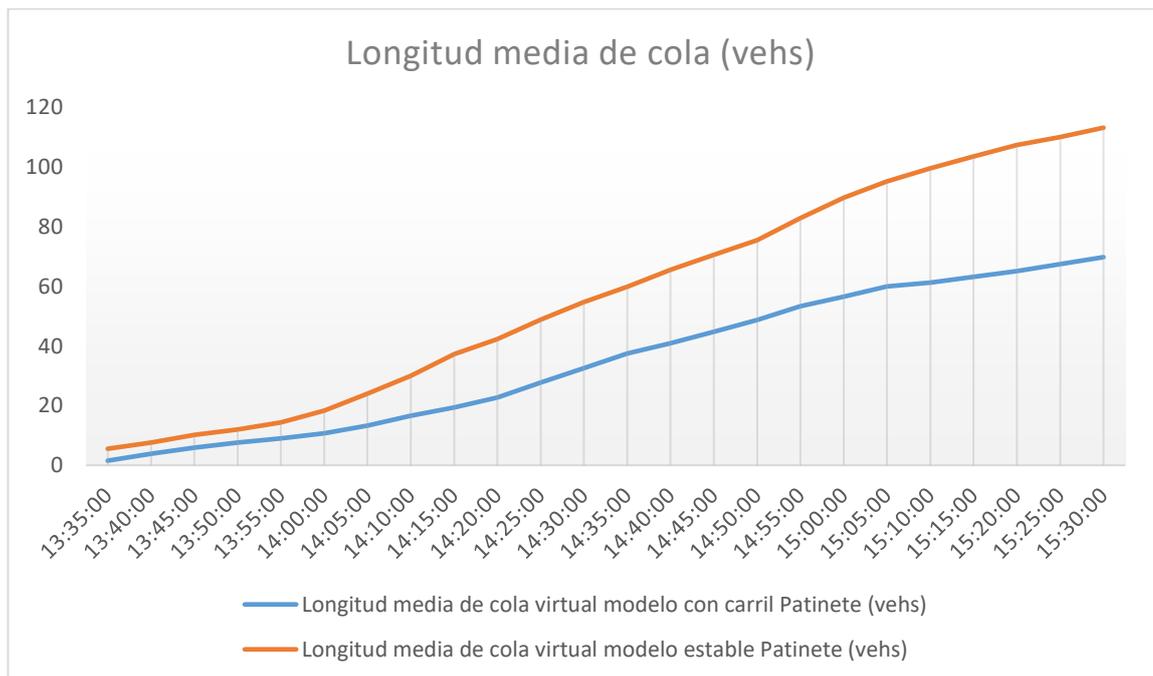
Los picos que se producen para cada modelo son completamente distintos. En el modelo con carril adicional los picos son mucho más bruscos, en el modelo estable el flujo es más lineal, por lo que un aumento de la demanda de tráfico de VMP no empeorará la situación para el flujo de vehículos.

Flujo de vehículos	veh/h
Modelo con carril adicional	281,1 veh/h
Modelo estable	315,4 veh/h

**Tabla 3.17.** Comparación valores medios de flujo de vehículos de los VMP.

Con los valores medios se ve que apenas aumentan 40 vehículos a la hora que en comparación con los 600 que disminuye en el caso de los coches es prácticamente despreciable aunque la demanda de VMP sea mucho más pequeña.

- Longitud media de cola (veh):



**Figura 3.55.** Comparación longitud media de cola virtual (vehs) de los VMP.

La gráfica de longitud media de cola sorprende por el gran aumento que se produce desde el primer periodo de tiempo que se mide hasta el último, dando un salto de hasta 60 vehículos en el modelo con carril adicional y un salto de casi 120 vehículos en el modelo estable, casi el doble de vehículos en cola de

un modelo a otro aunque la demanda de tráfico haya aumentado apenas 1,2 veces.

Pero esta longitud media de cola puede ser un problema. Si en cada periodo aumenta tanto esto puede deberse a que se esté produciendo una acumulación excesiva de vehículos en cada intersección. Además, al contrario que en los análisis anteriores para los coches, al salir del periodo de hora punta los valores de la longitud media de cola no disminuyen ni se estabilizan.

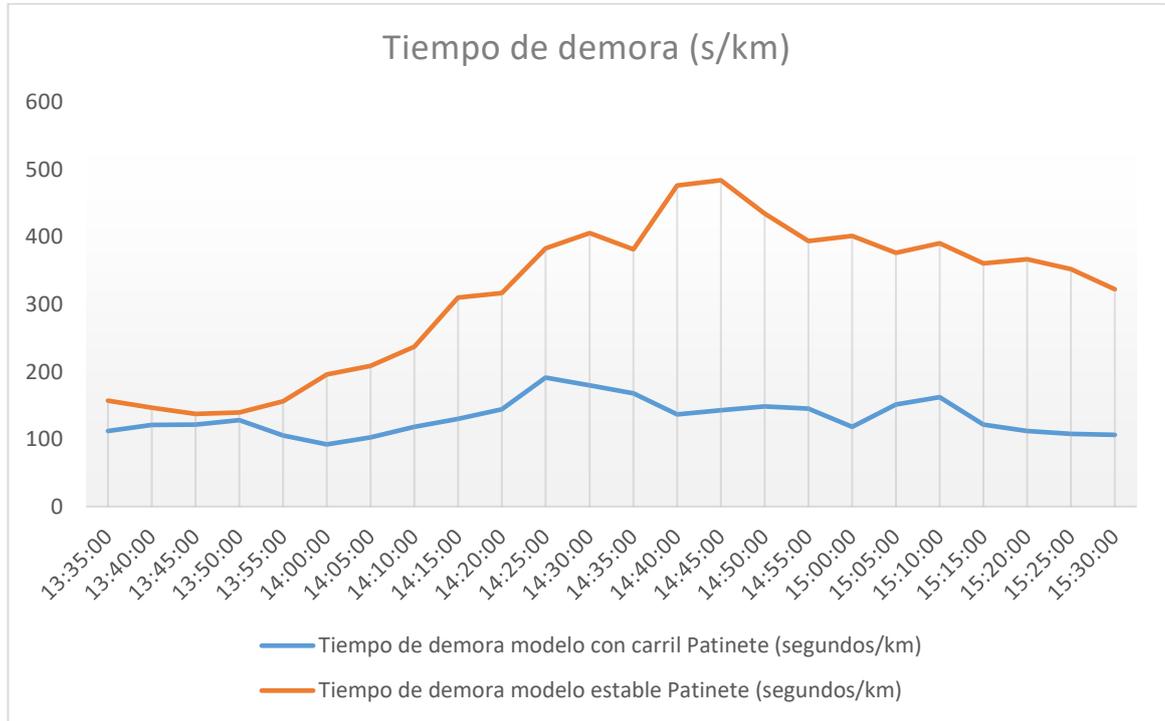
También hay que tener en cuenta que el programa sitúa a cada VMP en fila, uno detrás de otro, pero en la realidad es posible que paren dos o incluso tres en paralelo, reduciendo así la longitud media de cola en la realidad.

Longitud media de cola	vehs
Modelo con carril adicional	34,99 vehs
Modelo estable	57,44 vehs

**Tabla 3.18.** Comparación valores medios de longitud media de cola virtual de los VMP.

Los valores medios verifican lo dicho anteriormente, la longitud media de cola aumentan casi el doble de un modelo a otro. Igual que hemos dicho que los valores medios del flujo de vehículos podrían significar una mejora del modelo con carril adicional, los valores de la longitud de cola reflejan que el aumento de la demanda de tráfico de VMP puede llegar a ser un problema y provocar un exceso de tráfico que dificulte su circulación.

- Tiempo de demora (s/km):



**Figura 3.56.** Comparación tiempo de demora (s/km) de los VMP.

El tiempo de demora comienza siendo parecido e incluso sobre las 13:50 llega a ser casi similar en ambos modelos pero a partir de este periodo en el modelo estable se produce un crecimiento con pequeños picos en algunos puntos hasta llegar al pico máximo a las 14:45 para continuar disminuyendo, con algún pico más, hasta el último periodo de estudio.

Como ocurría con la longitud de cola en el modelo estable, el tiempo de demora aumenta también demasiado en comparación al factor de crecimiento que se ha utilizado para cambiar la demanda de tráfico. Las acumulaciones debidas a la longitud de cola será probablemente la causa de este aumento en el tiempo de demora.

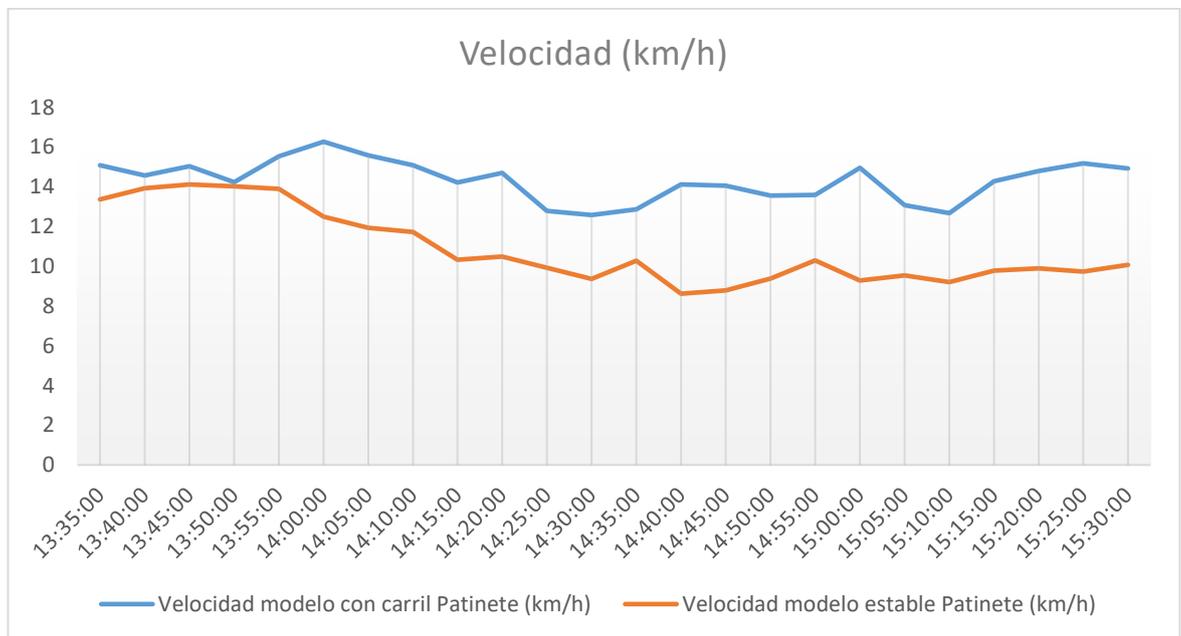
En el modelo con carril los valores de tiempo de demora están todos comprendidos entre 100 y 200 segundos por kilómetro, pero en el caso de del modelo estable los valores están comprendidos entre 100 y 500 segundos por kilómetro. El aumento es de dos veces más de un modelo a otro.

Tiempo de demora	s/km
Modelo con carril adicional	132,06 s/km
Modelo estable	314,21 s/km

**Tabla 3.19.** Comparación valores medios de tiempo de demora de los VMP.

El valor medio de cada modelo refleja lo que hemos comprobado gráficamente. Como se ha comentado para el parámetro anterior, el programa no permite a los VMP circular de manera paralela, ni permite ningún tipo de adelantamiento, sitúa a cada vehículo en fila uno detrás de otro. Este aspecto es distinto en la realidad ya que sí que sería posible teniendo en cuenta la anchura del carril.

- Velocidad (km/h):



**Figura 3.57.** Comparación velocidad (km/h) de los VMP.

Como se esperaba, la velocidad en el modelo estable va a ser menor que en el modelo con carril a lo largo de todo el periodo de

estudio. Aunque la variación es apreciable no se produce un cambio tan drástico como en los dos parámetros anteriores.

Hasta las 13:55 la velocidad es muy similar en ambos modelos, pero a partir de esta hora en el modelo con carril la velocidad aumenta hasta el máximo pico a las 14:00 y se mantiene más o menos estable con algún que otro pico. El modelo estable alcanza su valor máximo a las 13:55, posteriormente disminuye hasta que, a partir de las 14:30, deja de disminuir y el modelo toma valores mucho más constantes.

Teniendo en cuenta que los VMP tienen permitido circular a una velocidad máxima de 25 kilómetros hora, en ningún caso se supera esta velocidad.

Velocidad	km/h
Modelo con carril adicional	14,32 km/h
Modelo estable	10,85 km/h

**Tabla 3.20.** Comparación valores medios de velocidad de los VMP.

Los valores medios son no son tan distintos como hemos visto en los otros dos parámetros, la diferencia es de apenas 4 kilómetros por hora, pero sí que se puede asegurar que la media será menor en el último modelo.

### 3.5.3.3. CARACTERÍSTICAS DE LA RED

- Número de paradas y tiempo de parada (s/km):

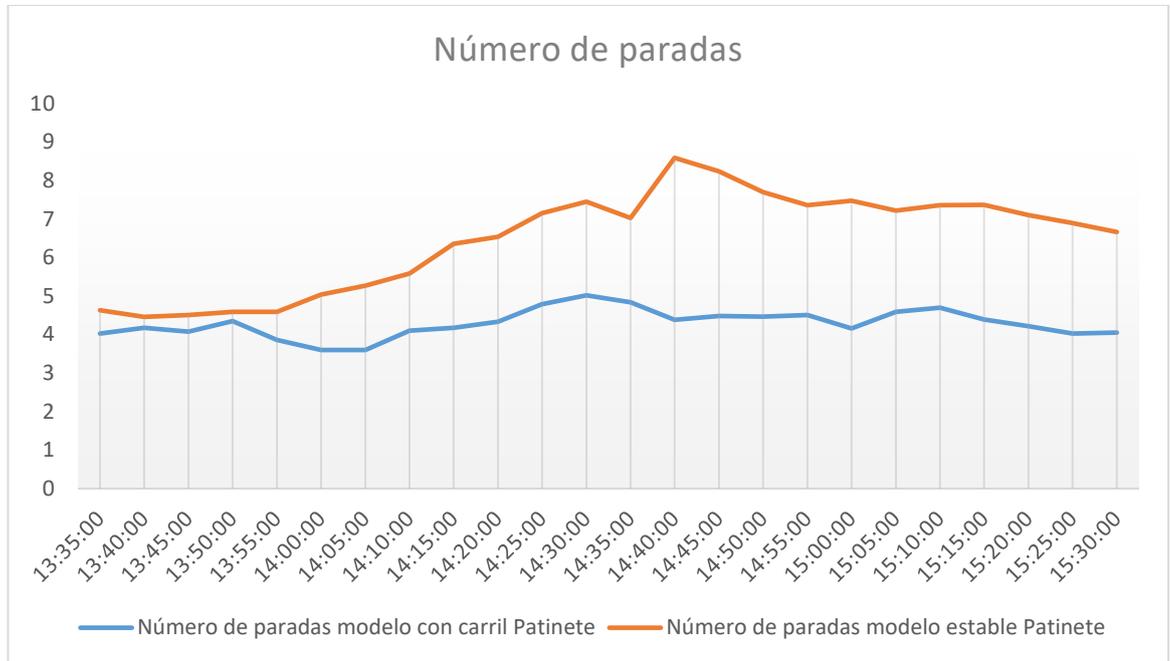


Figura 3.58. Comparación número de paradas.

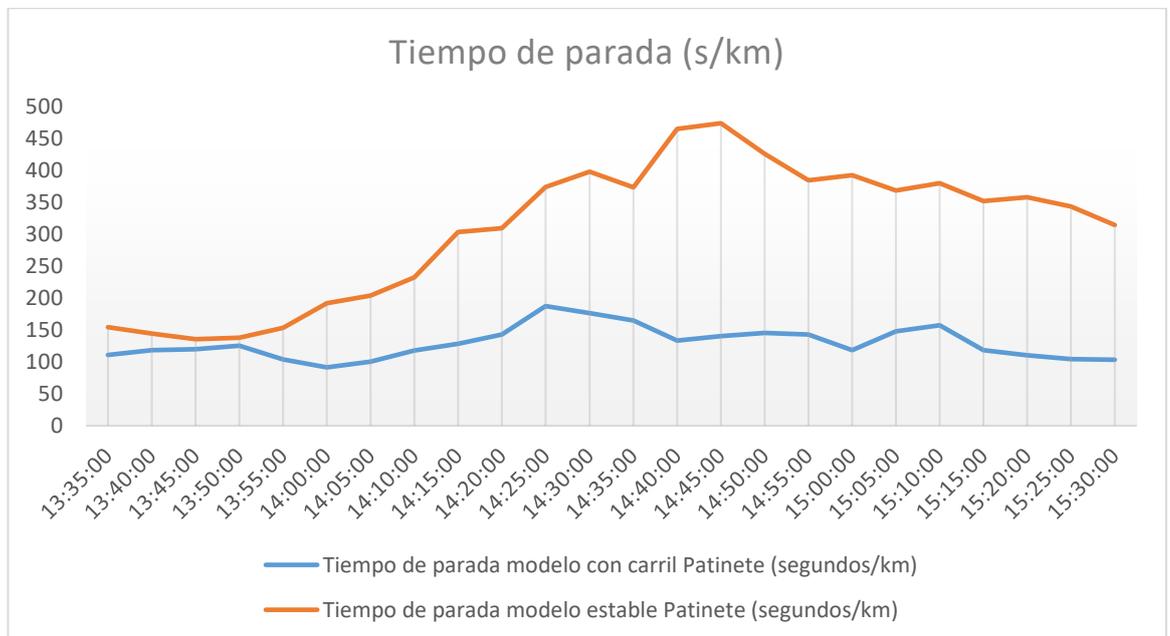


Figura 3.59. Comparación tiempo de parada (s/km) de los VMP.



El número de paradas que realizan los VMP es mayor en el modelo estable, como era de esperar, pero la diferencia de paradas a lo largo de todo el periodo no es tan significativo, ya que las paradas no van a variar tanto de un modelo a otro. Estos valores se ven influenciados principalmente por el número de intersecciones del modelo. Pero al haber mayor longitud media de cola en el modelo estable los vehículos se van a ver obligados a parar en una misma intersección más de una vez.

En el modelo con carril el máximo número de paradas que hace un vehículo será 5, mientras que en el modelo estable el máximo de paradas son 9. El mínimo de paradas es, en ambos casos, de 4.

En la gráfica de la figura 3.x. volvemos a tener el mismo patrón que en la de longitud de cola y tiempo de demora. Esto se debe a que estos tres parámetros están relacionados entre ellos. Cuanto mayor sea la longitud de cola más tiempo permanecerán parados los vehículos y mayor será el tiempo de demora. Por eso el tiempo de parada en el modelo estable aumenta de forma tan exagerada y tiene valores comprendidos entre una gran escala, comenzando con aproximadamente 150 segundos por kilómetro y alcanzando su valor máximo a las 14:45 con 470 segundos por kilómetro.

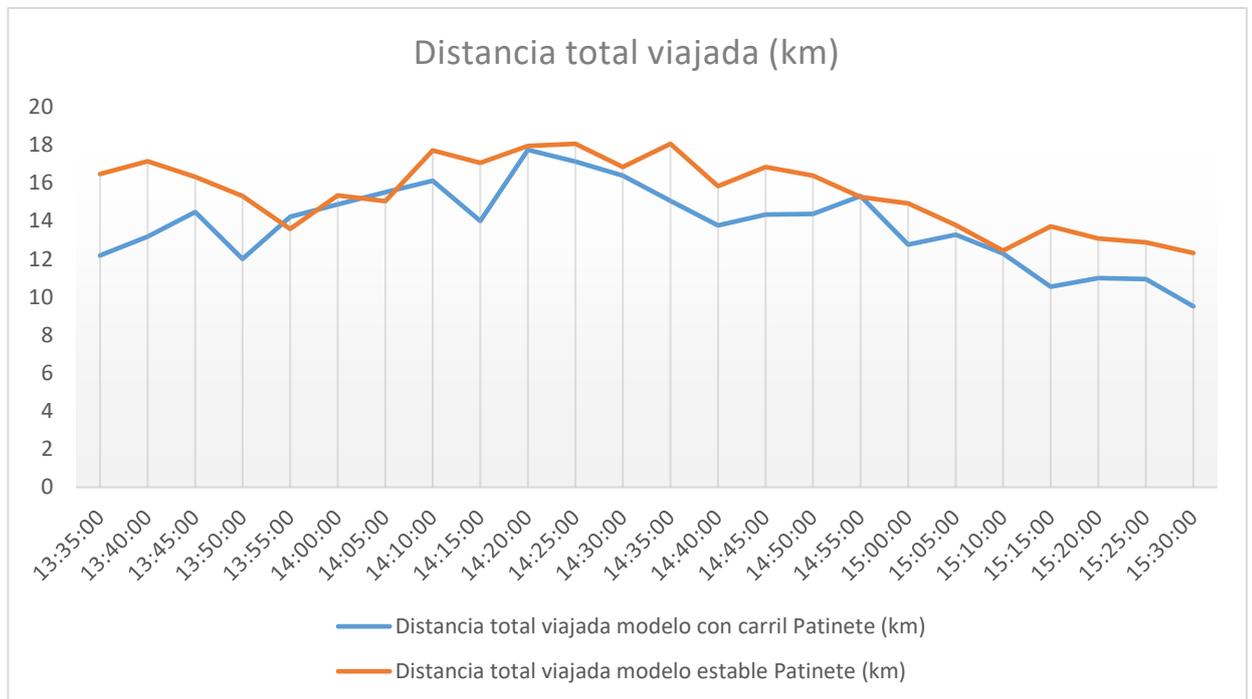
De forma muy distinta se representa el tiempo de parada para el modelo con carril donde no se producen grandes cambios, solamente un pico a las 14:30 con el valor más alto que toma este parámetro a lo largo del periodo donde apenas supera los 190 segundos por kilómetro. El valor mínimo no baja de 80 segundos por kilómetro, siendo esta variación muy pequeña en comparación con el otro modelo

	Número de paradas	Tiempo de parada
<b>Modelo con carril adicional</b>	4,29	129,67 s/km
<b>Modelo estable</b>	6,47	307,24 s/km

**Tabla 3.21.** Comparación valores medios de número de paradas y tiempo de parada de los VMP.

La diferencia es mucho mayor para el tiempo de parada de un modelo a otro, tomando valores más grandes en el modelo estable que en el otro, en cambio en el número de paradas la variación es mucho menos significativa pero aun así se producen más paradas en el modelo estable también.

- **Distancia total viajada (km):**



**Figura 3.60.** Comparación distancia total viajada (km) de los VMP.

La gráfica de la distancia total viajada es prácticamente igual que la gráfica del flujo de vehículos. Los puntos toman valores más altos

para el modelo estable pero se cruza en algunos casos con la representación de puntos del modelo con carril, llegando en alguno de ellos a ser inferior en el modelo estable.

En general los dos modelos toman valores similares a lo largo de toda la simulación. Los picos en la mayoría de periodos que se representan no coinciden. Al haber mayores tiempos de demora en el modelo estable como consecuencia los vehículos recorrerán más distancia en este. Aunque la diferencia es muy pequeña como se verá en los valores medios de cada uno.

El valor máximo de la distancia total viajada de ambos modelos coincidirá siendo aproximadamente de 18 kilómetros.

Distancia total viajada	km
Modelo con carril adicional	13,79 km
Modelo estable	15,51 km

**Tabla 3.22.** Comparación valores medios de distancia total viajada de los VMP.

Los valores medios de la distancia total viajada apenas se diferencian en 2 kilómetros que, en comparación con el cambio de otros parámetros, podríamos considerar insignificante y no aporta mucha información para obtener una conclusión.

### 3.6. RESULTADOS

Los resultados globales que se han obtenido tras realizar las simulaciones de todos los modelos se recoge en la tabla que se muestra en la figura 3.23:

	<i>Modelo real</i>	<i>Modelo año objetivo sin carril adicional</i>	<i>Modelo año objetivo con carril adicional</i>	<i>Modelo estable</i>
<i>Flujo</i>	5.846,10 veh/h	6.154,90 veh/h	6.082 veh/h	5.408,4 veh/h
<i>Longitud media cola</i>	16,34 vehs	52,75 vehs	85,47 vehs	6,44 vehs
<i>T. Demora</i>	133,68 s/km	147,54 s/km	147,15 s/km	119,28 s/km
<i>Velocidad</i>	22,78 km/h	21,97 km/h	22,06 km/h	23,74 km/h
<i>Nº paradas</i>	3,6	3,72	3,71	3,41
<i>T. Parada</i>	112,23 s	125,08 s	124,68 s	99,02 s
<i>Distancia total viajada</i>	425,28 km	446,2 km	436,43 km	391,20 km
<i>Tiempo total de viaje</i>	78.673,86 s	87.716,27 s	85.853,85 s	68.106,17 s

**Tabla 3.23.** Resultados de la simulación de los coches.

	<b>Modelo año objetivo con carril adicional</b>	<b>Modelo estable</b>
<b>Flujo</b>	281,10 veh/h	315,4 veh/h
<b>Longitud media cola</b>	34,99 vehs	57,44 vehs
<b>T. Demora</b>	132,06 s/km	314,21 s/km
<b>Velocidad</b>	14,32 km/h	10,85 km/h
<b>Nº paradas</b>	4,29	6,47
<b>T. Parada</b>	129,67 s	307,24 s
<b>Distancia total viajada</b>	13,79 km	15,51 km

**Tabla 3.24.** Resultados de la simulación de los VMP.

# CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

## 4.1. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este proyecto se ha obtenido un método de trabajo para el estudio del tráfico aplicado a zonas urbanas, en este caso la del barrio de la Rondilla, a través del software proporcionado por el programa AIMSUN.

Las conclusiones del proyecto son las siguientes:

- El programa AIMSUN ha resultado una herramienta extremadamente útil a la hora de realizar las valoraciones sobre el tráfico en la zona urbana estudiada, permitiendo una gran cantidad de resultados y además permitiendo obtener una validación que nos asegura una semejanza de las simulaciones a la realidad muy certera. Es un programa muy versátil y gracias a él se han obtenido una gran cantidad de informes:
  - La caracterización de la demanda de tráfico (vehículos privados, autobuses, bicicletas y vehículos de movilidad personal).
  - La construcción de una red urbana objeto de nuestro estudio.
  - La regulación de los factores que afectan a la demanda de tráfico (semáforos, carriles, marcas viales, sentidos...).
  - El conocimiento del flujo de vehículos en cada uno de los carriles representados.
  - El conocimiento de todo tipo de parámetros que afectan a la red y que permiten analizar la red y obtener los resultados (flujo de vehículos, longitud media de cola, tiempo de demora, tiempo y número de paradas, velocidad, distancia total de viaje...).
- Los resultados obtenidos para las simulaciones del tráfico en la red de la Rondilla son los siguientes:



- Las previsiones de tráfico en el 2021 apuntan a un crecimiento en la demanda de vehículos privados, que aunque vaya a ser notable, no afectará en gran medida. La hora punta con más tráfico seguirá siendo de 14:00 a 15:00 y por eso se ha estudiado este periodo de tiempo, incluyendo 30 minutos adicionales a esta hora, antes y después de la misma. Desde las 13:30 hasta las 15:30, ya que, si los resultados obtenidos son positivos para este periodo lo serán para todos los demás.
- En el primer cambio realizado para el estudio de la demanda de coches en el año objetivo, sin haber incluido la creación del carril adicional para los VMP, se han obtenido resultados similares que simplemente reflejan un aumento en el flujo de vehículos.
- La apertura del nuevo carril en la Avenida Palencia para la circulación tanto de las bicicletas como de los VMP dará solución al gran problema que se plantea hoy en día sobre la regulación de este tipo de vehículos.
- En el segundo cambio realizado se ha tenido en cuenta el crecimiento de ventas de los vehículos de movilidad personal para hacer una estimación de su demanda de tráfico, la cual solo se ha contemplado a lo largo de la Avenida Palencia en ambos sentidos. Considerando que la entrada y salida de este nuevo carril se producirá en la Calle Real de Burgos, donde se ensanchará 1,5 metros el carril que ya se encuentra destinado para bicicletas.

Los resultados obtenidos para la demanda de tráfico de los coches han sido muy similares en los dos modelos, pero se puede asegurar que ha empeorado levemente. Aunque no se haya modificado la demanda de coches, al añadir una nueva fase para los VMP en las intersecciones con señales semafóricas, el tráfico de los coches es menos fluido y hay mayores longitudes de cola. Pero por el resto de parámetros los dos modelos se pueden considerar iguales.



Los nuevos desplazamientos de los VMP quitan viajes en bici, caminando y en transporte público y muy poco de los coches, por eso la demanda de tráfico de los coches es similar.

- El tercer y último cambio ha consistido en modificar las demandas de tráfico de los dos vehículos que forman parte del estudio. Visto el éxito de los VMP, en los próximos años se producirán muchos más desplazamientos en este tipo de vehículos, disminuyendo los que se realizan en coche. Esta nueva alternativa es mucho más económica, menos contaminante y, dependiendo de la distancia de viaje, más rápida. Esta nueva situación que se establecería en las ciudades es la que se representa en el modelo estable, con un aumento de la demanda de VMP y una disminución de la demanda de coches.
- El tráfico de coches se verá mejorado en todos los parámetros. El cambio afectará sobre todo a la hora punta, donde se produce una variación más significativa. La velocidad media a la que circularán los coches aumentará y el tiempo medio de viaje se reducirá. En este nuevo modelo se consigue una mejora de esta demanda.
- El tráfico de los VMP estará más saturado. El flujo de vehículos por hora aumenta en más de 30 vehículos, lo que provoca que la longitud de cola, el tiempo de parada y el de demora se dispare. Al contrario, la velocidad de circulación será menor, aspecto que podría considerarse positivo, visto la cantidad de accidentes que se han producido hasta ahora.  
Estos últimos resultados no son del todo fiables ya que el programa no contempla ni la circulación ni la parada de estos vehículos en paralelo y tampoco permite los adelantamientos.

Vistos los resultados que se han analizado, podemos ver como esta nueva propuesta podría solucionar el problema principal de la circulación de los VMP y además podría ser una mejora del tráfico para los coches. La creación

de este nuevo carril y la modificación de la anchura del que se encuentra hoy en día provocarían problemas en el barrio mientras se esté implantando.

A partir de las valoraciones obtenidas, los responsables de implantar esta nueva medida tendrán que estudiar los aspectos negativos y positivos de cada modelo para asegurarse de que se toma una decisión correcta.

- Se ha comprobado la validez del programa para su aplicación como herramienta de trabajo en el estudio de las demandas de tráfico de cualquier tipo de red.

## 4.2. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Se señalan como posibles líneas futuras de investigación para este Trabajo de Fin de Grado las siguientes:

- Estudios técnicos de apoyo para la creación de una nueva normativa que actualice la Instrucción 16/V-124 y contemple las nuevas necesidades para la circulación de los VMP, con el objetivo de aumentar la seguridad de todos los flujos que conviven en el área urbana considerada.
- Continuidad de los trabajos del grupo de tráfico:
  - Estudio de la movilidad peatonal en la Rondilla.
  - Optimización de la movilidad general en el barrio, integrando en el modelo un estudio específico del transporte público.
  - Estudio de una posible zona de aparcamiento con puntos de carga para los VMP.
- Análisis del tráfico peatonal en nuestro modelo para el estudio del comportamiento de su combinación con el tráfico de los VMP, pudiendo reducir posibles accidentes entre ellos.



- Estudiar de un escenario con un aumento masivo de la demanda de los VMP y su regulación a lo largo de toda la ciudad.
- Extender el estudio realizado en el barrio de la Rondilla a toda la ciudad, con el objetivo de realizar un Plan de Movilidad General para la ciudad de Valladolid, incorporando este tipo de carriles destinados a la circulación de los VMP.



# CAPÍTULO 5: ESTUDIO ECONÓMICO

## 5.1. INTRODUCCIÓN

En este último capítulo se presenta un estudio de los gastos en los que se ha incurrido en la realización de este proyecto, con el objetivo de conocer la viabilidad económica del mismo.

Para la evaluación de los costes de personal, en la realización de este TFG se ha considerado que han formado parte del equipo los siguientes técnicos:

- **Un Ingeniero Industrial.**
- **Un Director del proyecto.**

Los costes salariales se han estimado teniendo en cuenta: sueldo neto, pagos a la Seguridad Social, vacaciones, días festivos, etc. Y el número de horas empleadas, así como el coste efectivo de cada una de las horas.

## 5.2. CÁLCULOS

### 5.2.1. COSTES DIRECTOS

Como costes directos se consideran aquellos que son directamente imputables a la elaboración del proyecto, entre los que se incluyen los gastos salariales del personal implicado en el mismo y el coste de amortización de los equipos utilizados. Estos costes se reparten entre los diferentes productos, dependiendo de la medida en que cada uno de ellos repercute en el coste del producto final.



### 5.2.1.1. COSTES DE PERSONAL

El coste horario del personal, se calcula dividiendo el coste anual del mismo por el número de horas efectivas estimadas que se han empleado en este TFG.

El Director del proyecto se ha encargado de supervisar, asesorar y corregir el trabajo del ingeniero durante el periodo de realización del mismo y una vez terminado dar el visto bueno definitivo.

El Ingeniero en Organización Industrial ha sido el encargado de recopilar toda la información, diseñar y elaborar el proyecto a lo largo de todas sus etapas. Este periodo de tiempo comienza desde el inicio del proyecto (Octubre 2018) y concluye con su finalización (Febrero 2018).

El número de horas de trabajo efectivas durante los meses que ha durado el proyecto (Octubre, Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero) se reflejan en la Tabla 5.1. que se muestra a continuación:

CONCEPTO	DÍAS
Días del año empleados	365
Sábados y Domingos	104
Días festivos vacacionales	22
Días festivos reconocidos	14
Días perdidos por motivos personales	5

<b>Total días efectivos</b>	220
<b>Horas diarias</b>	8
<b>Horas efectivas</b>	1.760

*Tabla 5.1. Horas efectivas de trabajo.*

El sueldo del Ingeniero y del Director del proyecto se calcula para los 5 de duración del trabajo, imputando un 35% de este a la Seguridad Social.

- **Coste del Director del proyecto:**

<b>CONCEPTO</b>	<b>COSTE</b>
<b>Sueldo neto</b>	34.000 €
<b>Seguridad Social (35%)</b>	11.900 €
<b>Total</b>	<b>45.600 €</b>
<b>Coste horario</b>	<b>26 €</b>

*Tabla 5.2. Sueldo y coste horario del Director del proyecto.*

- Coste del Ingeniero en Organización Industrial:

CONCEPTO	COSTE
Sueldo neto	20.000 €
Seguridad Social (35%)	7.000 €
<b>Total</b>	<b>27.000 €</b>
<b>Coste horario</b>	<b>15 €</b>

*Tabla 5.3. Sueldo y coste horario del Ingeniero.*

Una vez determinados los costes horarios del personal, hay que realizar una estimación del número de horas empleadas por cada uno de ellos en la realización del proyecto en cada una de sus etapas. En la tabla 5.4. aparecen representadas el número de horas:

	CONCEPTO	HORAS EMPLEADAS	HORAS TOTALES
<b>INGENIERO</b>	Estudio previo y documentación	60	<b>465</b>
	Recogida y análisis de datos (Horas de campo)	20	

<b>INDUSTRIAL</b>	Aprendizaje del software	90	
	Desarrollo del modelo	65	
	Calibración, validación y simulación	150	
	Propuestas de mejora	60	
	Análisis de resultados y redacción de informes	80	
<b>DIRECTOR DEL PROYECTO</b>	Documentación	10	<b>75</b>
	Análisis de datos	30	
	Propuestas de mejora	25	
	Elaboración de la documentación	10	

**Tabla 5.4.** Número de horas invertidas por cada integrante.

El coste total de cada empleado se ha calculado una vez conocidas las horas de dedicación de cada integrante a partir del coste horario de los mismos.

CONCEPTO	INGENIERO EN ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL	DIRECTOR DEL PROYECTO
Horas empleadas	465	75
Coste horario	15 €/hora	26 €/hora
Total	6.975 €	1.950 €
Total Coste de Personal	8.925 €	

*Tabla 5.5. Coste total de personal.*

### 5.2.1.2. COSTES DE AMORTIZACIÓN DE MATERIAL

En este apartado se calcula el coste de amortización considerando un método de amortización lineal en el tiempo.

En la tabla 5.6., aparecen los datos de los costes y vida útil del material utilizado:

	CONCEPTO	PRECIO TOTAL	VIDA ÚTIL
EQUIPO INFORMÁTICO	Ordenador DELL MAD-GLK3NH2	1000 €	3
	Impresora HP Officejet 4655	85 €	3



SOFTWARE	S.O. Windows 10 Enterprise	105 €	3
	Software AIMSUN6.1. Advanced	3.000 €	3
	Paquete Microsoft Office Professional Plus 2013	76 €	1

**Tabla 5.6.** Costes y vida útil del material utilizado.

	CONCEPTO	ÍNDICE DE AMORTIZACIÓN (€/HORAS)	HORAS DE TRABAJO	COSTE DE AMORTIZACIÓN
EQUIPOS INFORMÁTICOS	Ordenador DELL MAD-GLK3NH2	0,19 €	465	88 €
	Impresora HP Officejet 4655	0,02 €	465	7 €
SOFTWARE	S.O. Windows 10 Enterprise	0,02 €	465	9 €
	Software AIMSUN6.1. Advanced	0,57 €	465	263 €
	Paquete Microsoft Office Professional Plus 2013	0,04 €	465	20 €
<b>Total Coste de Amortización</b>		<b>387 €</b>		

**Tabla 5.7.** Coste de amortización.

El coste de amortización se calcula multiplicando el coste horario del material por el número de horas que se ha utilizado el equipo. El coste horario del material se calcula dividiendo el coste total entre la vida útil estimada (supuesto un valor residual nulo), este valor también se conoce como índice de amortización y el número de horas efectivas de trabajo por año. Se considerará

que los días efectivos de funcionamiento de los equipos utilizados coinciden con las horas que se han empleado en realizar el proyecto, es decir, 465 horas.

En la tabla 5.7. aparecen representado los costes totales de amortización.

### 5.2.1.3. COSTES DE MATERIALES CONSUMIBLES

Los costes de los materiales que se han utilizado en la realización del TFG también hay que tenerlos en cuenta como costes directos. En la tabla 5.8. se muestra el coste de cada uno.

CONCEPTO	COSTE
Papel de impresión 300 hojas (A4, 80 g/m <sup>2</sup> )	25 €
Cartucho de tinta número 301 para impresora HP Deskjet	40 €
CD's (CD-R, 700 MB, 80 min, 52x)	13 €
Otros	100 €
<b>Total Coste de Material</b>	<b>178 €</b>

*Tabla 5.8. Coste de material.*

#### 5.2.1.4. COSTES TOTALES DIRECTOS

Los costes totales directos se han calculado como suma del coste de personal, el coste de amortización de los equipos y el coste del material, así como otros costes directos (transporte, etc.). Estos costes se reflejan en la tabla 5.9.

CONCEPTO	COSTE
Total Coste de Personal	8.925 €
Total Coste de Amortización	387 €
Total Coste de Material	178 €
Otros costes directos	150 €
<b>TOTAL COSTES DIRECTOS</b>	<b>9.640 €</b>

*Tabla 5.9. Total de costes directos.*

#### 5.2.2. COSTES INDIRECTOS

En el apartado de los costes indirectos se consideran todos aquellos que no son directamente imputables a la elaboración del proyecto, como son los gastos administrativos, el consumo eléctrico, el gasto telefónico etc. Estos costes se representan en la tabla 5.10.

CONCEPTO	COSTE
Costes de Servicios Administrativos	300 €
Otros gastos	180 €
<b>TOTAL COSTES INDIRECTOS</b>	<b>480 €</b>

*Tabla 5.10. Total de costes indirectos.*

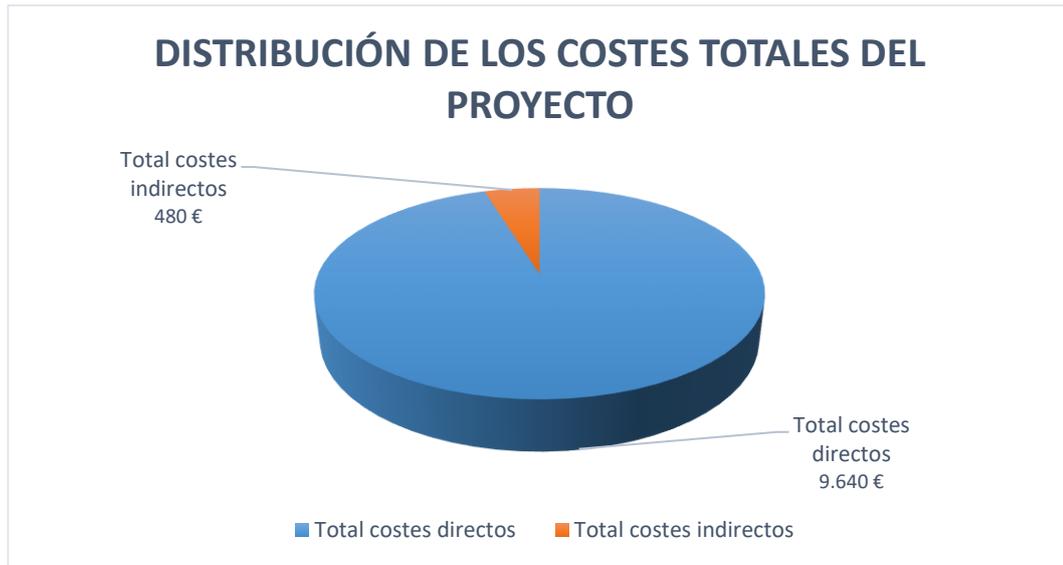
### 5.3. COSTE TOTAL DEL PROYECTO

El coste total del proyecto se calcula como la suma de los costes directos y los indirectos. Este coste aparece reflejado en la tabla 5.11.

CONCEPTO	COSTE
Total costes directos	9.640 €
Total costes indirectos	480 €
<b>COSTE TOTAL DEL PROYECTO</b>	<b>10.120 €</b>

*Tabla 5.11. Coste total del proyecto.*

En la siguiente figura se representa gráficamente los costes totales del proyecto por concepto:



**Figura 5.1.** Coste total del proyecto por conceptos.



## BIBLIOGRAFÍA

- **Libros.**

- *Manual de carreteras.* BAÑÓN BLÁZQUEZ, Luis; BEVIÁ GARCÍA, José Francisco. Alicante: Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.A. (2000).
- *Plan Integral de Movilidad Urbana ciudad de Valladolid. Informe sobre movilidad.* Valladolid. Ayuntamiento de Valladolid (2003).
- *Manual de capacidad de carreteras.* Madrid. Asociación Técnica de Carreteras. Asociación Técnica de Carreteras. (1995).
- *Ingeniería de Transporte.* Editorial Limusa. WILLIAM W. HAY (1983).
- *Introduction to transportation engineering.* S. L. Mc Graw Hill.
- *Vías de comunicación.* S. L. Editorial Limusa. (1983).
- *Libro verde de urbanismo y la movilidad.* Comisión de Transportes. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Marzo 2008.
- *Modelización de la Red de Transportes.* Ingeniería de Transporte. Universidad de Valladolid (2006).
- *Aimsun 6.1 New Features.* TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.
- *Aimsun Macroscopic Modelling Manual v6\_1.* TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.



- *Aimsun MicroMeso Users Manual v6\_1*. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.
  - *Aimsun Users Manual v6\_1*. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.
  - *Aimsun's Adaptive control interfaces Manual v6\_1*. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.
  - *Aimsun's Planning software interfaces Manual v6\_1*. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.
  - *Aimsun's Signal optimisation interfaces Manual v6\_1*. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.
- **Proyectos.**
    - *Modelización y simulación de las características del tráfico en la Rondilla*. VALDUNQUILLO MADRAZO, Juan Ángel. Proyecto de Fin de Carrera (1999).
    - *Análisis, valoración y gestión de tráfico de la glorieta Avenida Zamora-Avenida Madrid en la provincia de Valladolid. Propuestas de mejora*. CRISTÓBAL LÁZARO, Javier. Proyecto de Fin de Carrera (2012).
    - *Evaluación de alternativas de movilidad a la supresión del Viaducto Arco de Ladrillo - García Morato con motivo del soterramiento del ferrocarril*. PARDO SOBA, Diego. Proyecto de Fin de Carrera (2013).
    - *Análisis y simulación del tráfico rodado en el barrio de la Rondilla*. FERNÁNDEZ MIGUEL, Juan. Proyecto de Fin de Carrera (2015).



- *Análisis y simulación del modelo de onda verde en el barrio de la rondilla*. SALVADOR ORTEGA, David. Proyecto de Fin de Carrera (2016).
- *Proyecto de reordenación del tráfico en el “Barrio de la Rondilla”*. Departamento Técnico de control de tráfico de Valladolid.
- *V.C. Los barrios de Valladolid. Ficha 04*.
- *Plan Integral de Movilidad Urbana, Sostenible y Segura de la Ciudad de Valladolid (PIMUSSVA)*. Ayuntamiento de Valladolid (2015).
- *Plan Integral de Movilidad Urbana Ciudad de Valladolid (PIMUVA)*. Ayuntamiento de Valladolid (2016).
- *Análisis e implantación del modelo de supermanzanas en el barrio de la Rondilla*. BLANCO SAN MIGUEL, Cristina. Proyecto de Fin de Carrera (2019).
- 
- **Páginas web.**
  - *Idealo (2018)*. <https://www.idealos.es/magazin/demanda-bicicletas-patinetes-electricos/>. (Último acceso noviembre 2018).
  - *Electromaps (2018)*. <https://www.electromaps.com/articulo/la-venta-de-vehiculos-electricos-aumenta-un-134-en-el-1er-trimestre-de-2018>. (Último acceso noviembre 2018).



- *El Norte de Castilla* (2018). <https://www.elnortedecastilla.es/valladolid/valladolid-fija-norma-20180924194501-nt.html> . (Último acceso diciembre 2018).
- Xataka (2018). <https://www.xataka.com/vehiculos/patinete-electrico-esta-cambiando-movilidad-urbana-tambien-tiene-detractores>. (Último acceso diciembre 2018).
- *El Mundo* (2018). <https://www.elmundo.es/madrid/2018/11/02/5bdb3ce346163faaba8b46ce.html>. (Último acceso diciembre 2018).
- *Asociación Vecinal Rondilla* (2016). <https://rondilla.org/fundacion-rondilla.html>. (Último acceso enero 2019).
- *Dirección General de Tráfico* (2019). [http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/normativa-legislacion/otras-normas/modificaciones/2016/Instr\\_16\\_V\\_124\\_Vehiculos\\_Movilidad\\_Personal.pdf](http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/normativa-legislacion/otras-normas/modificaciones/2016/Instr_16_V_124_Vehiculos_Movilidad_Personal.pdf) . (Último acceso enero 2019).
- Ayuntamiento de Valladolid (2019). <https://www.valladolid.es/es/temas/hacemos/observatorio-urbano-datos-estadisticos-ciudad/datos-estadisticos-temas/division-territorial-ciudad-mapas/division-zonas-estadisticas>. (Último acceso enero 2019).
- Xataka (2019). <https://www.xataka.com/vehiculos/https://www.xataka.com/vehiculos/tipos-patinetes-electricos-dgt-asi-se-van-a-regular-vehiculos-movilidad-personal>. (Último acceso enero 2019).



- *PIMUSSVA (2019)*. [http://www.pimussva.es/wp-content/uploads/2016/05/PIMUSSVA\\_Analisis\\_de\\_la\\_Movilidad.pdf](http://www.pimussva.es/wp-content/uploads/2016/05/PIMUSSVA_Analisis_de_la_Movilidad.pdf). (Último acceso enero 2019).
- *Autopistas (2019)*. <https://www.autopista.es/noticias-motor/articulo/vehiculos-de-movilidad-personal-ciudad-que-son-normativa-tipos>. (Último acceso enero 2019).
- *Las Provincias (2019)*. <https://www.lasprovincias.es/sociedad/quiere-tener-regulados-20190206140021-ntrc.html>. (Último acceso febrero 2019).

- **Artículos periodísticos**

- *Las ciudades empiezan a regular el patinete eléctrico en sus calles*. El Norte de Castilla (2018).
- *Valladolid se fija en la norma de Barcelona para regular el uso del patinete eléctrico*. El Norte de Castilla (2018).
- *Valladolid se fija en la norma de Barcelona para regular el uso del patinete eléctrico*. El Norte de Castilla (2018).
- *¿Qué seguros tienen los patinetes eléctricos?* El Mundo (2018).
- *Los patinetes eléctricos y las nuevas formas de movilidad requieren una regulación nacional*. El Español (2018).
- *Las ciudades se inundan de patinetes eléctricos*. Economía Digital (2018).
- *Los patinetes eléctricos reclaman su espacio en las ciudades*. La Razón (2018).

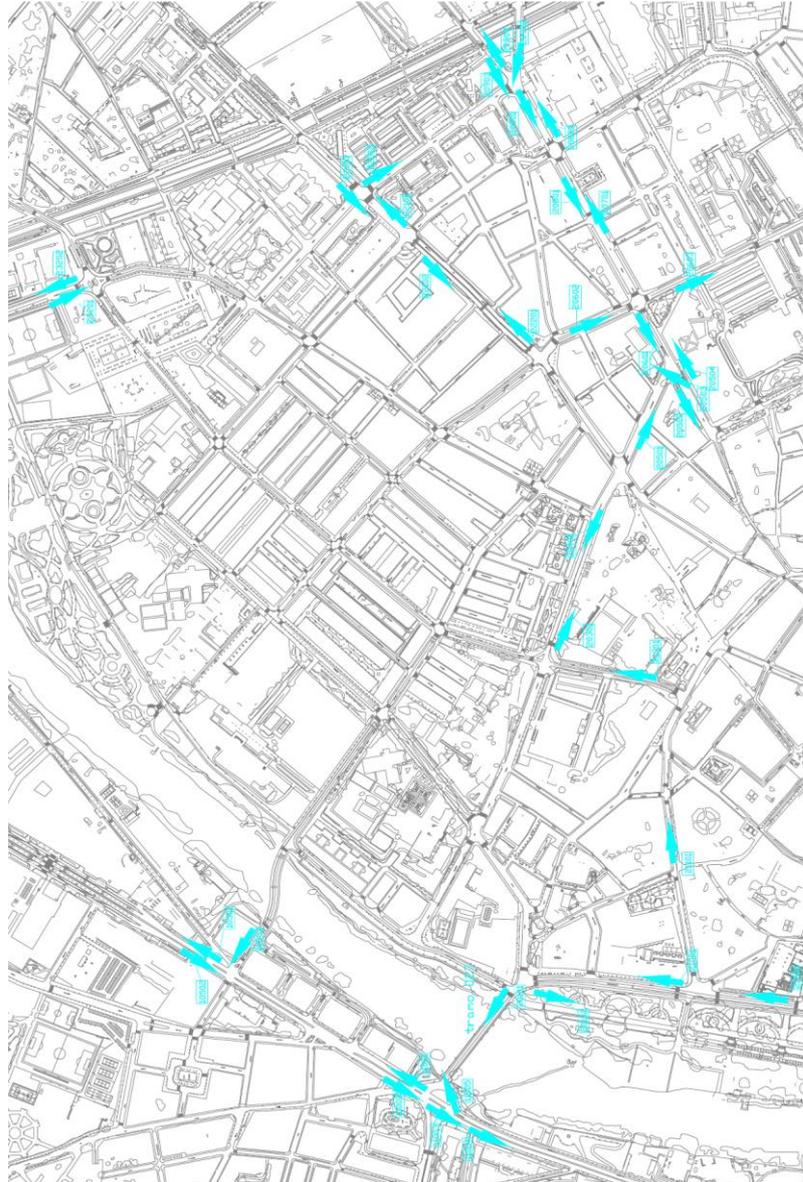


## ANEXOS

- **Datos cedidos por el Ayuntamiento de Valladolid.**
  - Mapa del barrio de la Rondilla con la situación de las espiras.
  - Datos de IMD anual de las espiras del mapa anterior.
  - Mapa con las señales semafóricas del barrio de la Rondilla.
  - Diagramas de fase, localización y giros de cada cruce semafórico.
  
- **Datos de espiras.**

El Ayuntamiento de Valladolid dispone de un elevado número de espiras permanentes situadas a lo largo de toda la ciudad que permiten conocer el número de vehículos que atraviesan cada una.

En la figura A.1. se muestra el mapa de la ubicación de las espiras en el barrio de la Rondilla, zona de estudio del proyecto. Su código y ubicación de numeración y los datos de IMD de los últimos años aparece en la tabla A.1.



**Figura A.1.** Mapa de ubicación espiras permanentes.

UBICACIÓN	P.M.	2015	
		Laboral	Festivo
RONDILLA SANTA TERESA -> GONDOMAR (CARDENAL TORQUEMADA)	PM020301	5.184	3.180
RONDILLA SANTA TERESA -> PASEO RENACIMIENTO (SANTA CLARA)	PM020401	11.291	7.405
REAL DE BURGOS -> HUELGAS (CHANCILLERÍA-ENTRADA)	PM020602	9.241	6.387
CARDENAL TORQUEMADA -> RONDILLA SANTA TERESA (SAN PABLO)	PM021301	9.393	6.166
AVDA. PALENCIA -> SANTA CLARA (AMOR DE DIOS)	PM022001	7.020	4.925
AMOR DE DIOS -> MADRE DE DIOS (AVDA. PALENCIA)	PM022002	3.347	2.160
AVDA. PALENCIA -> AVDA. SANTANDER (PENITENCIA)	PM022101	4.680	3.074
AVDA. PALENCIA -> SANTA CLARA (PENITENCIA)	PM022102	7.412	5.193
AVDA. PALENCIA -> AVDA. SANTANDER (REAL DE BURGOS)	PM022201	4.123	2.845
RÁBIDA -> PORTILLO DE BALBOA (CARDENAL TORQUEMADA)	PM023201	3.043	2.038
RÁBIDA -> EURO (CARDENAL TORQUEMADA)	PM023202	1.972	1.317

**INTERPRETACIÓN:** RÁBIDA -> EURO (CARDENAL TORQUEMADA) Indica que el Punto de Medida cuenta los vehículos que van desde la calle La Rábida hacia(->) la Avenida del Euro y está **ubicado()** en Cardenal Torquemada

Tabla A.1. Datos de espiras en IMD anual.



- **Intersecciones semafóricas.**

Las 13 intersecciones que forman el barrio de la Rondilla y están reguladas por semáforos mantienen la siguiente codificación usada por el gabinete de movilidad del Ayuntamiento de Valladolid son:

- *Cruce 202* - C/Rondilla de Santa Teresa- C/Mirabel.
- *Cruce 203* - C/Rondilla de Santa Teresa- C/Cardenal Torquemada.
- *Cruce 204* - C/Gondomar- C/Santa Clara.
- *Cruce 220* - Avda. de Palencia - C/Amor de Dios.
- *Cruce 221* - Avda. de Palencia - C/Penitencia.
- *Cruce 222* - Avda. de Palencia - C/Real de Burgos.
- *Cruce 226* - C/Cardenal Torquemada – C/Tirso de Molina.
- *Cruce 227* - C/Cardenal Torquemada – C/Cardenal Cisneros.
- *Cruce 228* - C/Cardenal Cisneros – C/Las Moradas.
- *Cruce 229* - C/Cardenal Cisneros – C/Portillo de Balboa.
- *Cruce 230* - C/Soto - C/Cardenal Torquemada.
- *Cruce 231* - C/Soto - C/Portillo de Balboa.
- *Cruce 232* - C/Cardenal Torquemada – C/Portillo de Balboa.

Los datos que aparecen a continuación muestran el mapa con la ubicación de intersecciones semafóricas y el diagrama de fase de cada uno. En la figura A.2. se representa este mapa, donde las marcadas en verde son las que pertenecen a la Rondilla.

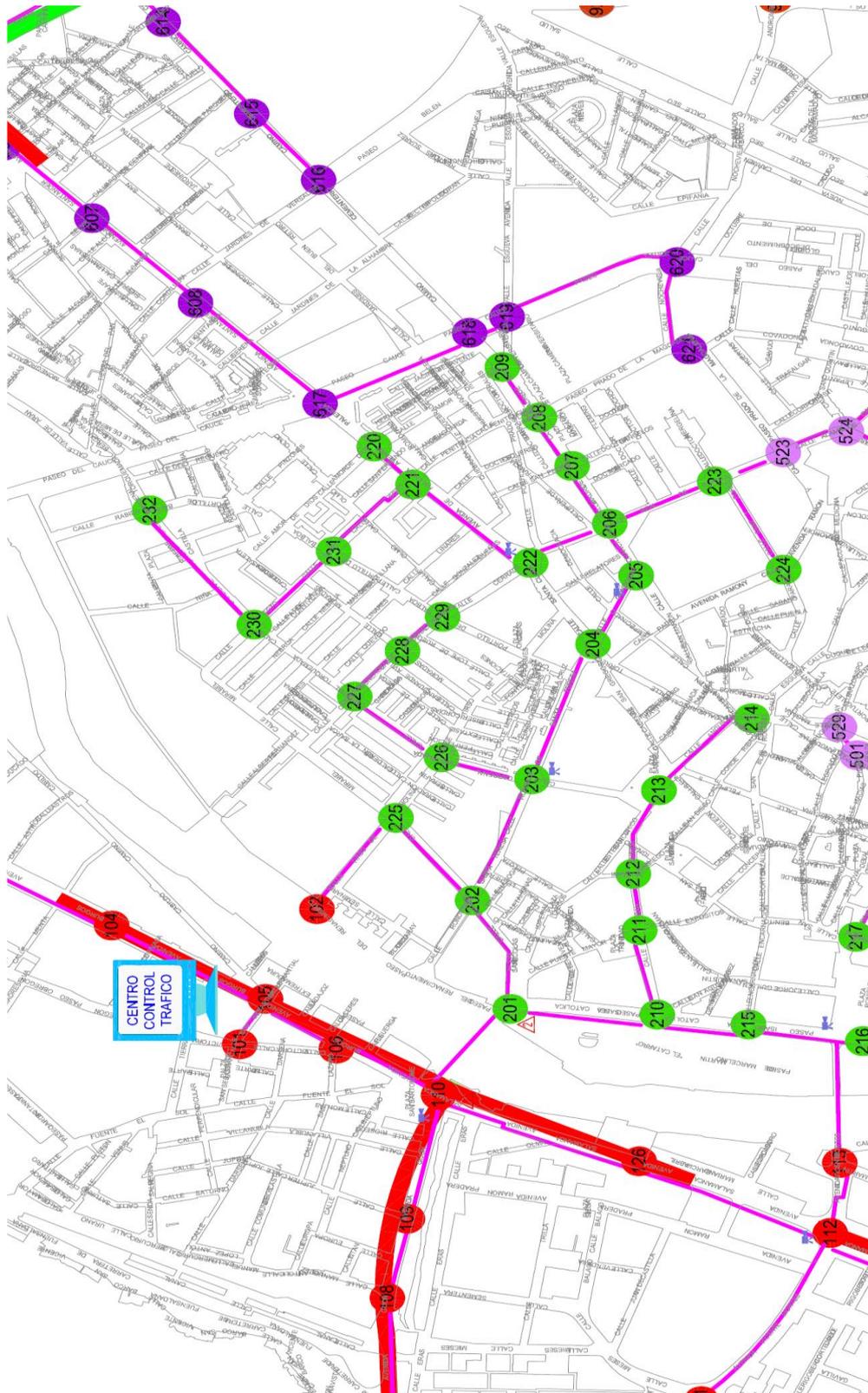


Figura A.2. Mapa de intersecciones semafóricas de la Rondilla.

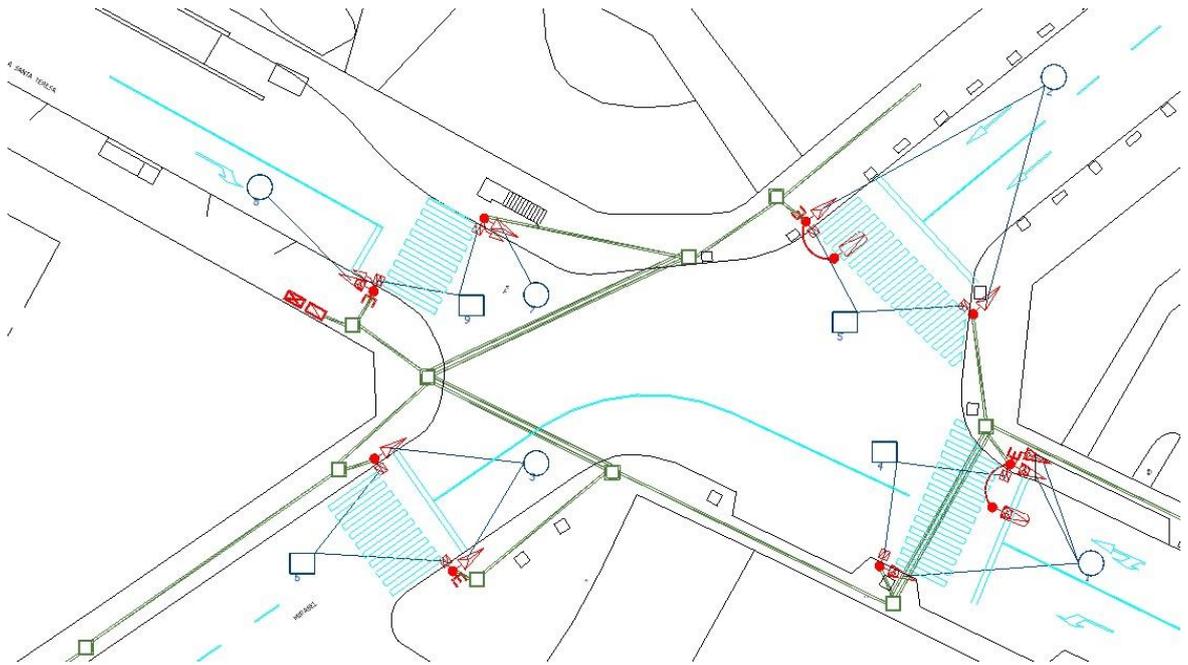


Figura A.3. Cruce 202- C/Rondilla de Santa Teresa- C/Mirabel.

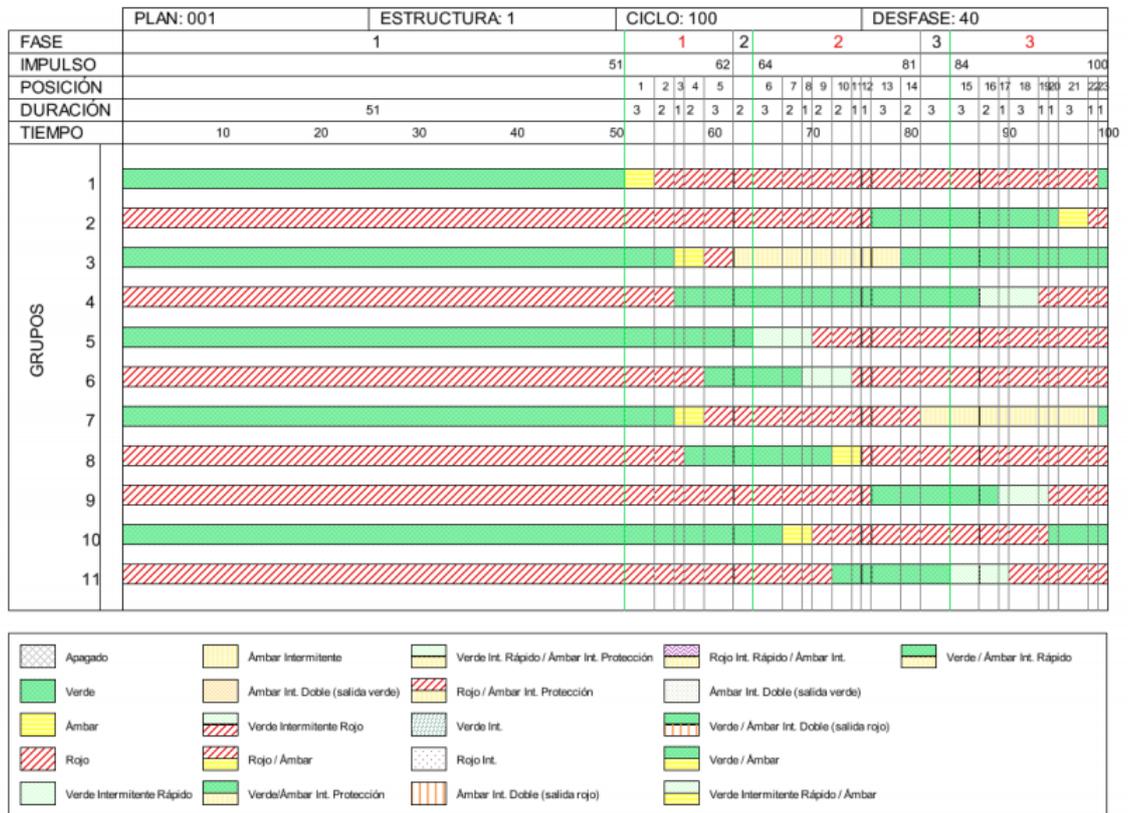


Figura A.4. Diagrama de fase del cruce 202- C/Rondilla de Santa Teresa- C/Mirabel.

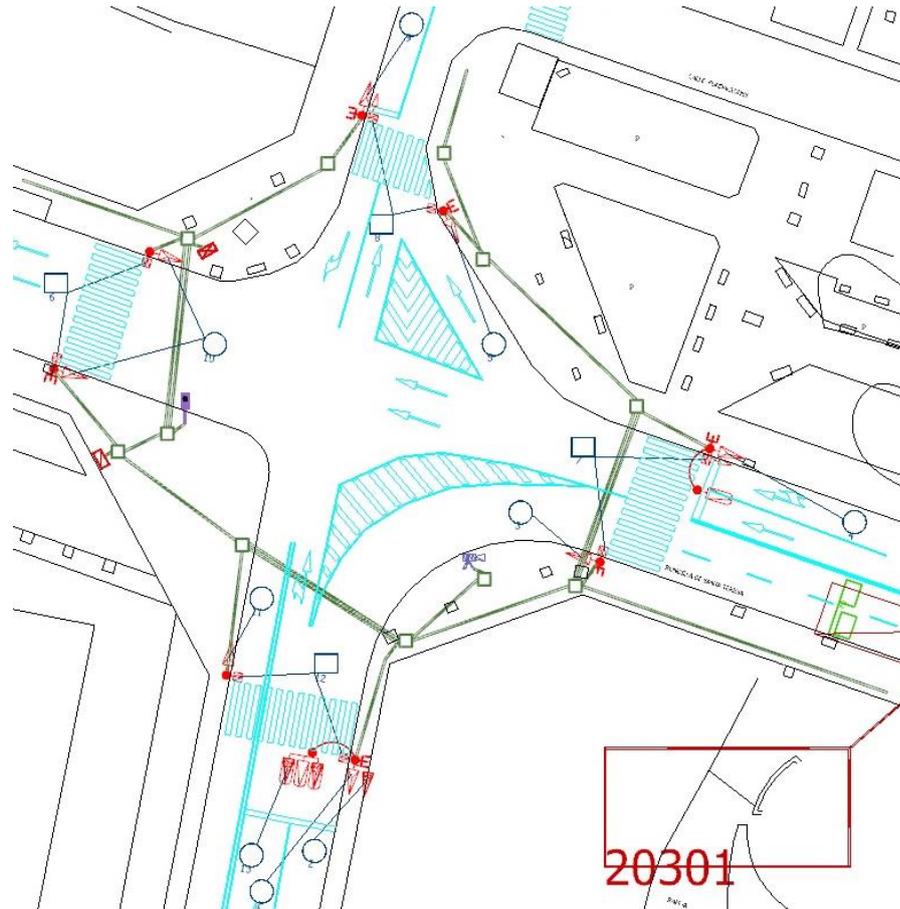


Figura A.5. Cruce 203- C/Rondilla de Santa Teresa- C/Cardenal Torquemada.

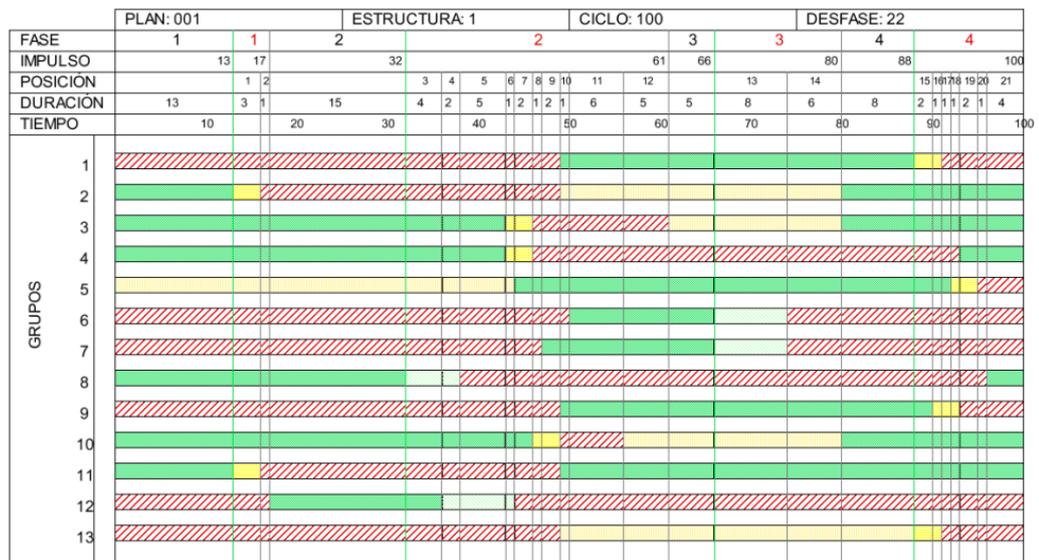


Figura A.6. Diagrama de fases del cruce 203- C/Rondilla de Santa Teresa- C/Cardenal Torquemada.

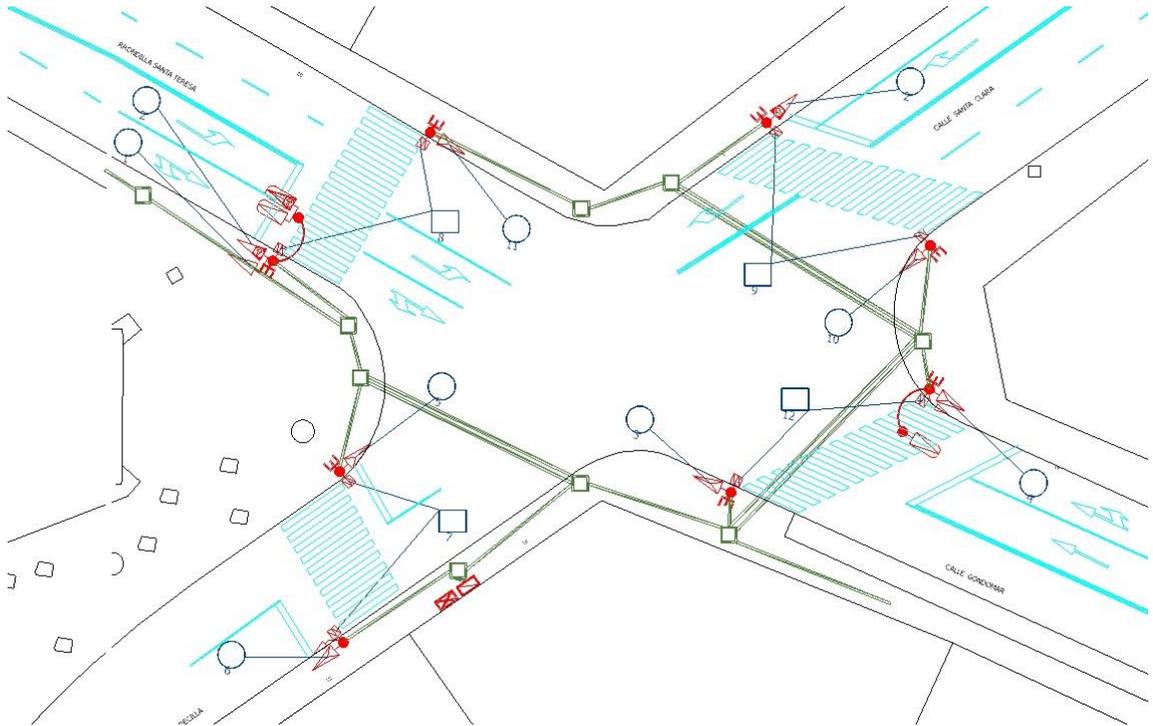


Figura A.7. Cruce 204- C/Gondomar- C/Santa Clara.

	PLAN: 001		ESTRUCTURA: 1					CICLO: 100				DESFASE: 8											
FASE	1		1					2		2		3		3									
IMPULSO	30		47					64		75		84		100									
POSICIÓN			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
DURACIÓN	30		4	5	11	3	1	2	17		3	2	1	1	4	9	8	2	1	1	2	1	1
TIEMPO	10	20	30						50	60				70	80	90						100	
GRUPOS	1	[Green bar from 0 to 64]																					
	2	[Red hatched bar from 0 to 47]																					
	3	[Green bar from 0 to 75]																					
	4	[Green bar from 0 to 47]																					
	5	[Yellow bar from 0 to 64]																					
	6	[Red hatched bar from 0 to 75]																					
	7	[Green bar from 0 to 47]																					
	8	[Red hatched bar from 0 to 75]																					
	9	[Green bar from 0 to 47]																					
	10	[Yellow bar from 0 to 64]																					
	11	[Green bar from 0 to 75]																					
	12	[Red hatched bar from 0 to 75]																					

Figura A.8. Diagrama de fases del cruce 204- C/Gondomar- C/Santa Clara

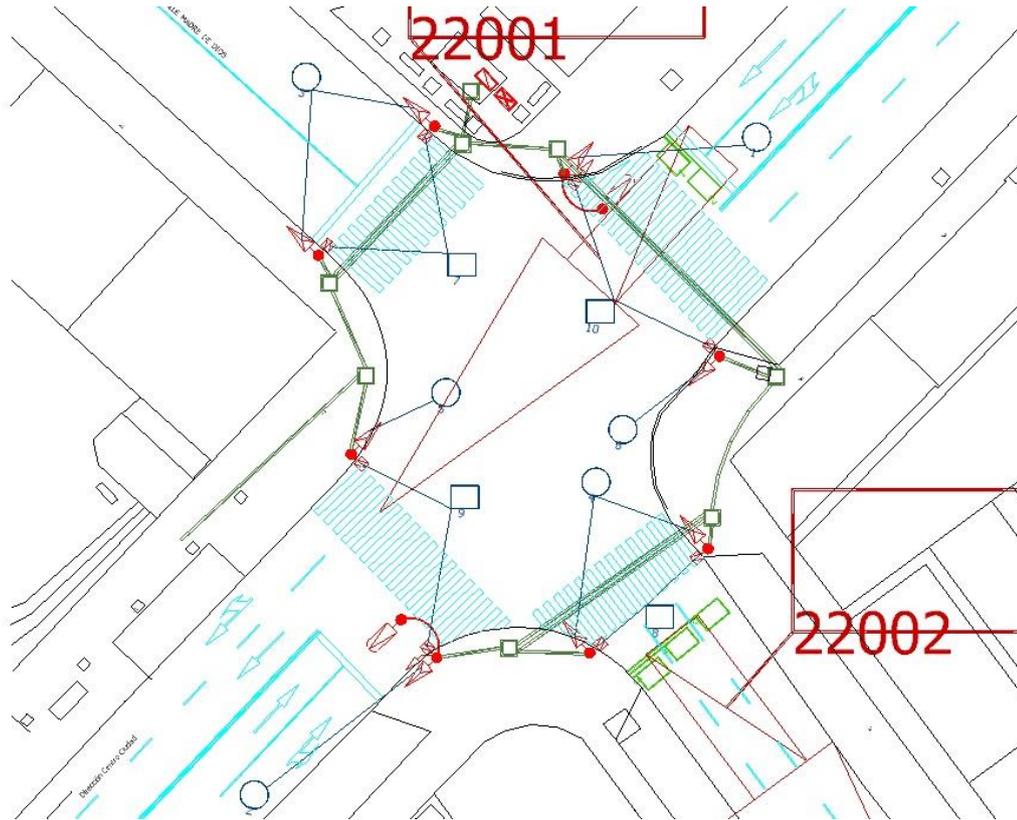


Figura A.9. Cruce 220- Avda. de Palencia - C/Amor de Dios.

	PLAN: 001		ESTRUCTURA: 1					CICLO: 100					DESFASE: 69																				
FASE	1		1					2					3																				
IMPULSO			30					41					58					78					87					100					
POSICIÓN			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18													
DURACIÓN	30		3	2	1	1	4	17	5	5	3	1	1	1	3	9	6	1	3	2	1												
TIEMPO	10	20	30				40	50	60						70	80	90					100											
GRUPOS	1	Green		Yellow					Red					Green					Yellow					Red									
	2	Red		Green					Yellow					Red					Green					Yellow					Red				
	3	Red		Green					Yellow					Red					Green					Yellow					Red				
	4	Green		Yellow					Red					Green					Yellow					Red									
	5	Green		Yellow					Red					Green					Yellow					Red									
	6	Green		Yellow					Red					Green					Yellow					Red									
	7	Green		Yellow					Red					Green					Yellow					Red									
	8	Red		Green					Yellow					Red					Green					Yellow					Red				
	9	Red		Green					Yellow					Red					Green					Yellow					Red				
	10	Red		Green					Yellow					Red					Green					Yellow					Red				

Figura A.10. Diagrama de fases del cruce 220- Avda. de Palencia - C/Amor de Dios.

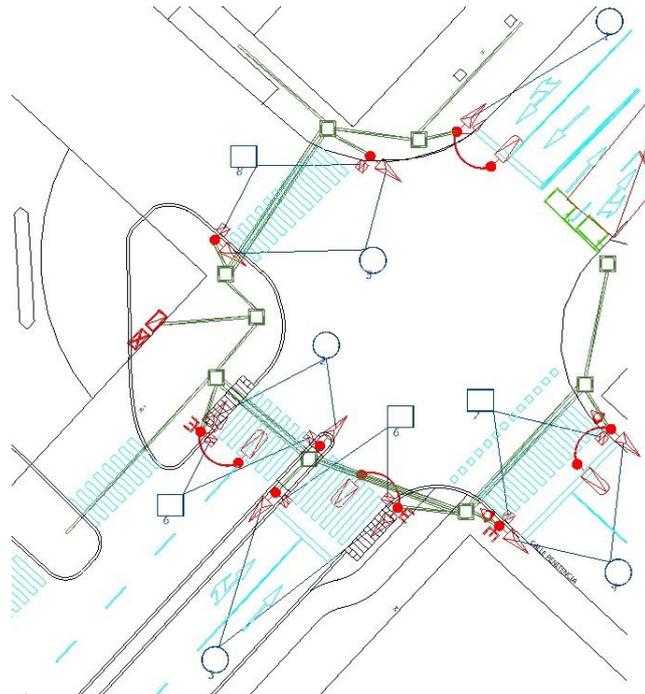


Figura A.11. Cruce 221- Avda. de Palencia - C/Penitencia.

		PLAN: 001		ESTRUCTURA: 1				CICLO: 100					DESFASE: 9													
FASE		1		1				2		2			3		3		4		4							
IMPULSO		21		36				48		70			82		92		94		100							
POSICIÓN				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18					
DURACIÓN		21		5	1	3	1	1	4	12		6	5	3	2	1	1	4	12		5	5	2	3	2	1
TIEMPO		10		20		30				40		50			60		70		80		90		100			
GRUPOS	1	[Red Hatched]		[Red Hatched]				[Red Hatched]		[Green]			[Green]		[Green]											
	2	[Green]		[Green]				[Green]		[Green]			[Green]		[Green]											
	3	[Green]		[Green]				[Green]		[Green]			[Green]		[Green]											
	4	[Red Hatched]		[Red Hatched]				[Red Hatched]		[Red Hatched]			[Red Hatched]		[Red Hatched]											
	5	[Green]		[Green]				[Green]		[Green]			[Green]		[Green]											
	6	[Red Hatched]		[Red Hatched]				[Red Hatched]		[Red Hatched]			[Red Hatched]		[Red Hatched]											
	7	[Green]		[Green]				[Green]		[Green]			[Green]		[Green]											
	8	[Red Hatched]		[Red Hatched]				[Red Hatched]		[Red Hatched]			[Red Hatched]		[Red Hatched]											

Figura A.12. Diagrama de fases del cruce 221- Avda. de Palencia - C/Penitencia.

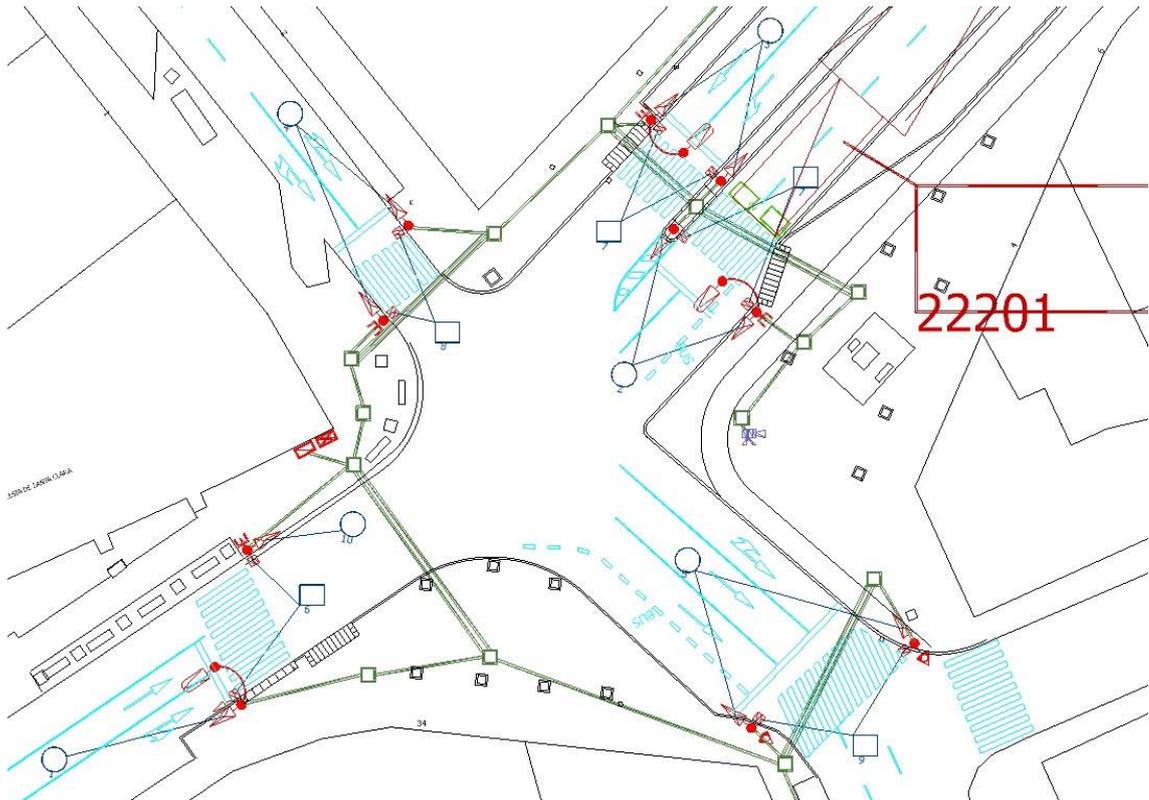


Figura A.13. Cruce 222- Avda. de Palencia - C/Real de Burgos.

	PLAN: 001		ESTRUCTURA: 1								CICLO: 100								DEFASE: 7							
FASE	1		1								2		2						3		3					
IMPULSO	27		45								58		81						90		100					
POSICIÓN			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		
DURACIÓN	27		3	1	1	1	1	1	1	2	1	6	13	2	4	2	1	3	2	3	6	9	4	1	2	3
TIEMPO	10	20	30								40	50	60						70	80	90	100				
GRUPOS	1	[Red hatched]																								
	2	[Green]																								
	3	[Red hatched]																								
	4	[Red hatched]																								
	5	[Green]																								
	6	[Red hatched]																								
	7	[Red hatched]																								
	8	[Green]																								
	9	[Red hatched]																								
	10	[Green]																								
	11	[Red hatched]																								
	12	[Green]																								
	13	[Red hatched]																								

Figura A.14. Diagrama de fases del cruce 222- Avda. de Palencia - C/Real de Burgos.

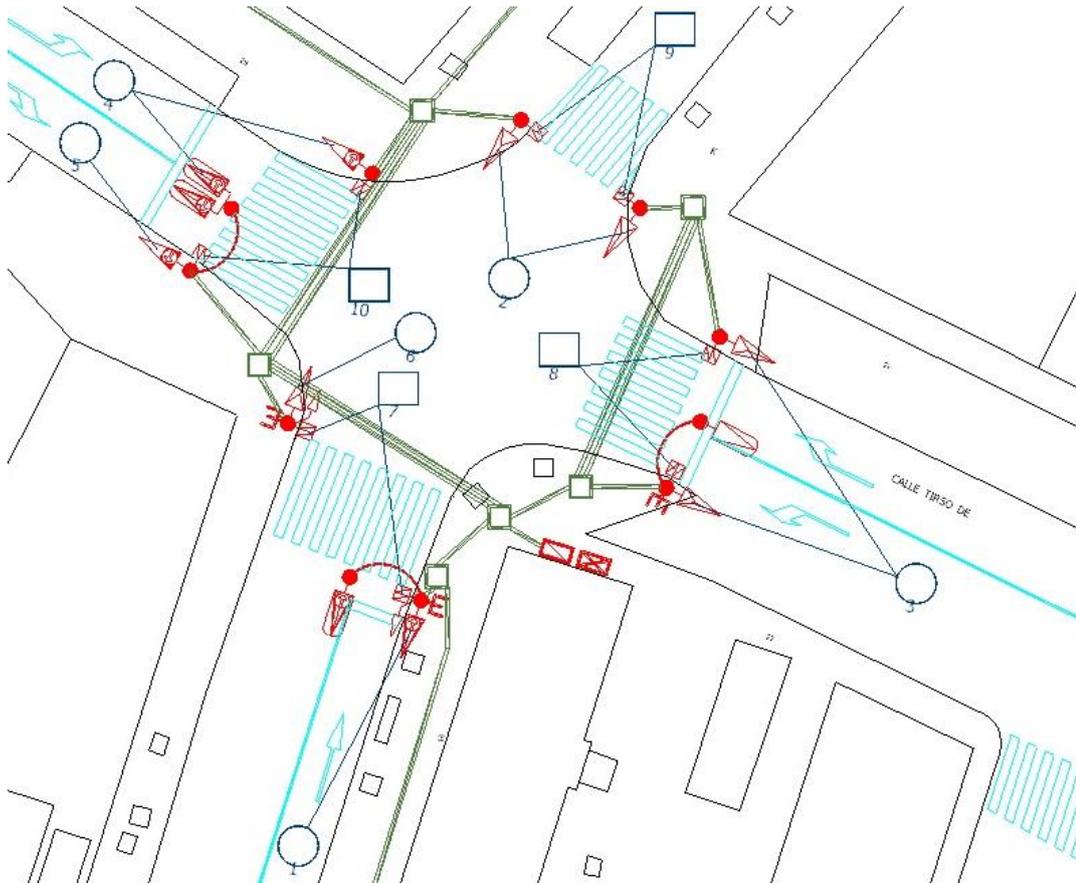


Figura A.15. Cruce 226- C/Cardenal Torquemada - C/Tirso de Molina.

	PLAN: 001			ESTRUCTURA: 1			CICLO: 100				DESFASE: 52				
FASE	1			1			2		2		3		3		
IMPULSO	25			35			55				73				
POSICIÓN				1	2	3			4	5	6	7	8	9	10
DURACIÓN	25			5	3	2	20		6	3	3	3	1	1	1
TIEMPO	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100					
GRUPOS	1	[Red Hatched]			[Green]			[Yellow]		[Red Hatched]					
	2	[Green]			[Yellow]			[Green]		[Red Hatched]					
	3	[Red Hatched]			[Green]			[Yellow]		[Red Hatched]					
	4	[Green]			[Yellow]			[Green]		[Red Hatched]					
	5	[Green]			[Yellow]			[Green]		[Red Hatched]					
	6	[Yellow]			[Green]			[Yellow]		[Red Hatched]					
	7	[Green]			[Yellow]			[Green]		[Red Hatched]					
	8	[Green]			[Yellow]			[Green]		[Red Hatched]					
	9	[Red Hatched]			[Green]			[Yellow]		[Red Hatched]					
	10	[Red Hatched]			[Green]			[Yellow]		[Red Hatched]					

Figura A.16. Diagrama de fases del cruce 226- C/Cardenal Torquemada - C/Tirso de Molina.

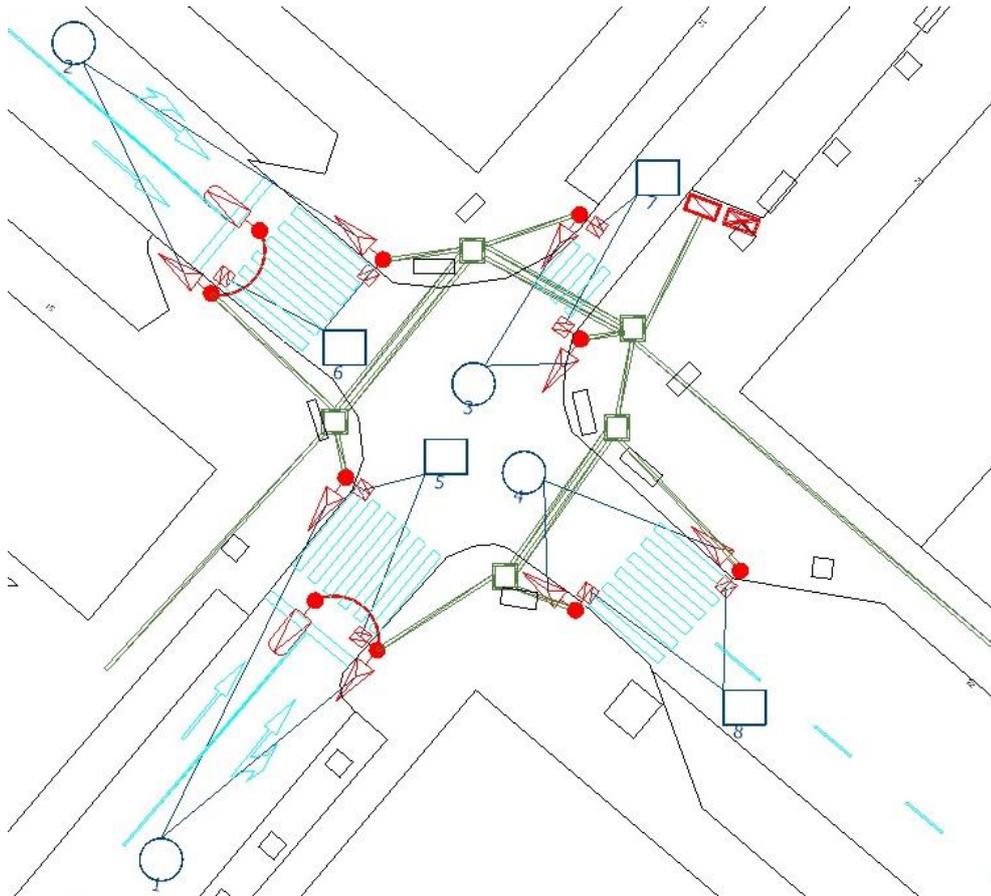


Figura A.17. Cruce 227- C/Cardenal Torquemada – C/Cardenal Cisneros.

		PLAN: 001		ESTRUCTURA: 1		CICLO: 100				DESFASE: 89													
FASE		1		1		2		2		3		3											
IMPULSO		23		33		56		71		82		100											
POSICIÓN		1	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
DURACIÓN		23		5	5	23		5	3	2	1	1	3	11	3	2	3	2	1	2	1	1	3
TIEMPO		10	20	30		40	50	60		70	80			90									100
GRUPOS	1	Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green	
	2	Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched	
	3	Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green	
	4	Yellow		Yellow		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green	
	5	Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched	
	6	Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green	
	7	Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched	
	8	Green		Green		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched		Red hatched	

Figura A.18. Diagrama de fases del cruce 227- C/Cardenal Torquemada – C/Cardenal Cisneros.

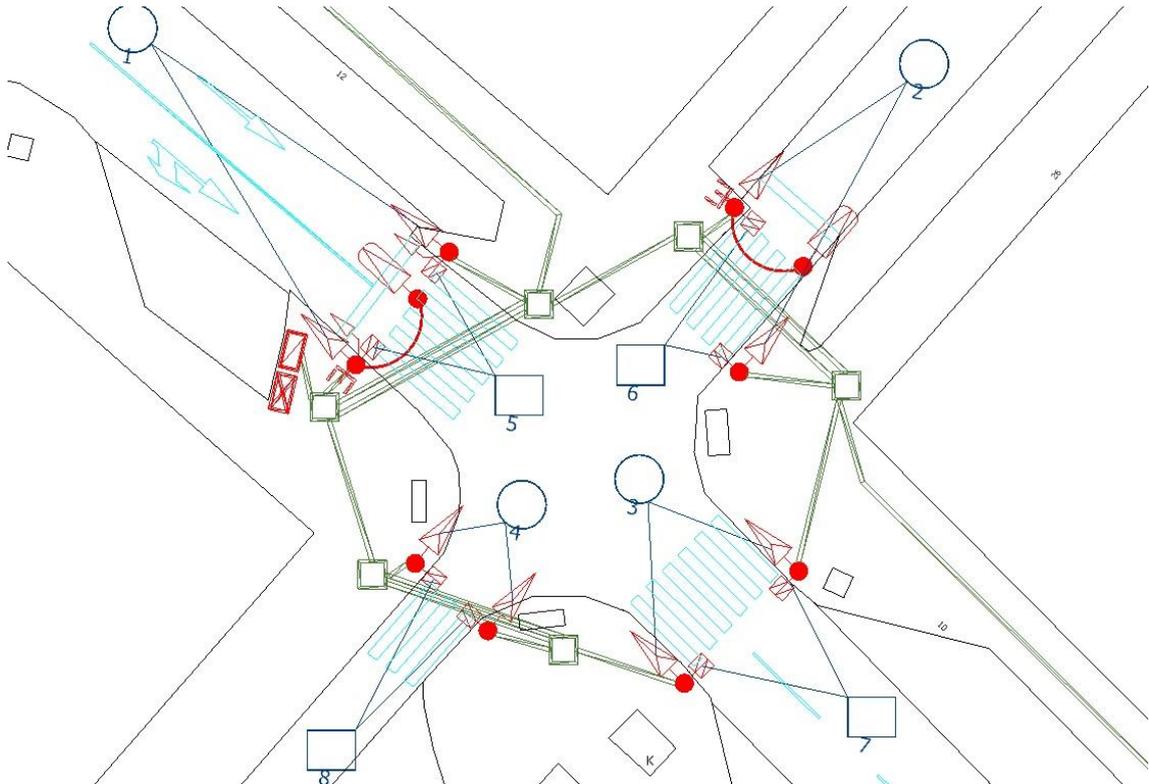


Figura A.19. Cruce 228- C/Cardenal Cisneros - C/Las Moradas.

		PLAN: 001		ESTRUCTURA: 1		CICLO: 100					DESFASE: 5						
FASE		1		1		2		2					3		3		
IMPULSO		22		32		50		68					78		100		
POSICIÓN				1 2				3 4 5 6 7					8 9		10 11 12 13 14 15		
DURACIÓN		22		6 4		18		6 3 3 2 4					10		6 6 1 2 1 2 2 2		
TIEMPO		10 20		30		40		50 60					70		80 90 100		
GRUPOS	1	Green		Green		Green		Green					Green		Green		
	2	Red Hatched		Red Hatched		Red Hatched		Red Hatched					Green		Green		
	3	Green		Green		Green		Green					Green		Green		
	4	Yellow		Yellow		Green		Green					Green		Green		
	5	Red Hatched		Red Hatched		Red Hatched		Red Hatched					Green		Green		
	6	Green		Green		Green		Red Hatched					Green		Green		
	7	Red Hatched		Red Hatched		Red Hatched		Red Hatched					Green		Green		
	8	Green		Green		Red Hatched		Red Hatched					Red Hatched		Red Hatched		

Figura A.20. Diagrama de fases del cruce 228- C/Cardenal Cisneros - C/Las Moradas.

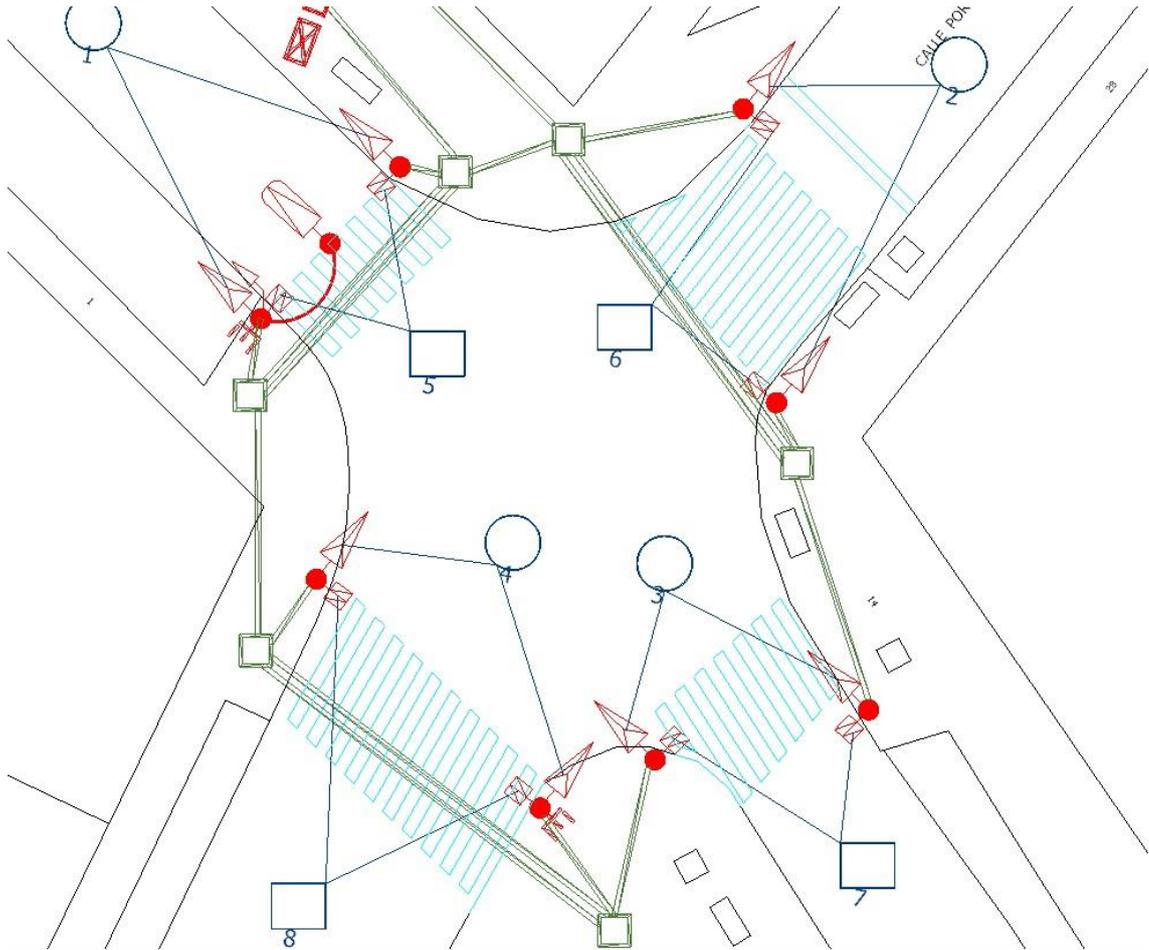


Figura A.21. Cruce 229- C/Cardenal Cisneros – C/Portillo de Balboa.

	PLAN: 001		ESTRUCTURA: 1		CICLO: 100				DESFASE: 12												
FASE	1		1		2		2		3		3										
IMPULSO	22		32		52		68		78		100										
POSICIÓN			1	2			3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
DURACIÓN	22		5	5	20		4	1	2	3	2	4	10	6	5	1	2	3	1	2	2
TIEMPO	10	20	30		40	50	60		70	80	90		100								
GRUPOS	1	Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green	
	2	Red		Red		Red		Red		Red		Red		Red		Red		Red		Red	
	3	Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green	
	4	Yellow		Yellow		Yellow		Yellow		Yellow		Yellow		Yellow		Yellow		Yellow		Yellow	
	5	Red		Red		Red		Red		Red		Red		Red		Red		Red		Red	
	6	Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green	
	7	Red		Red		Red		Red		Red		Red		Red		Red		Red		Red	
	8	Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green		Green	

Figura A.22. Diagrama de fases del cruce 229- C/Cardenal Cisneros – C/Portillo de Balboa.

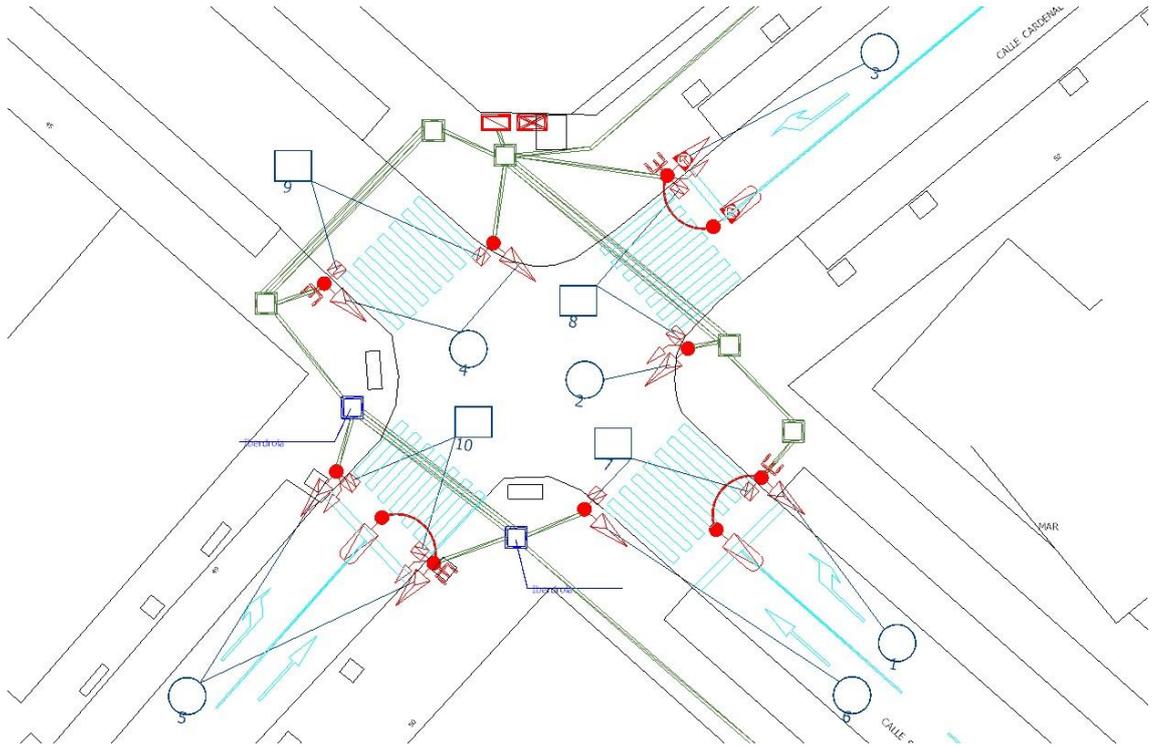


Figura A.23. Cruce 230- C/Soto - C/Cardenal Torquemada.

		PLAN: 001						ESTRUCTURA: 1						CICLO: 100						DESFASE: 83									
FASE		1		1				2		2				3		3													
IMPULSO		14		30		59		69		78		100																	
POSICIÓN		1		2	3	4	5	6	7		8	9	10	11	12		13	14	15	16	17	18	19	20					
DURACIÓN		14		5		5	1	3	11	29		3		1	1	1	4	9		5		2	3	2	1	3	1	1	4
TIEMPO		10		20		30		40		50		60		70		80		90		100									
GRUPOS	1	Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red					
	2	Yellow		Green		Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green		Red					
	3	Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green					
	4	Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red					
	5	Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green					
	6	Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red					
	7	Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green					
	8	Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red					
	9	Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green		Red		Yellow		Green					
	10	Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red		Green		Yellow		Red					

Figura A.24. Diagrama de fases del cruce 230- C/Soto - C/Cardenal Torquemada.

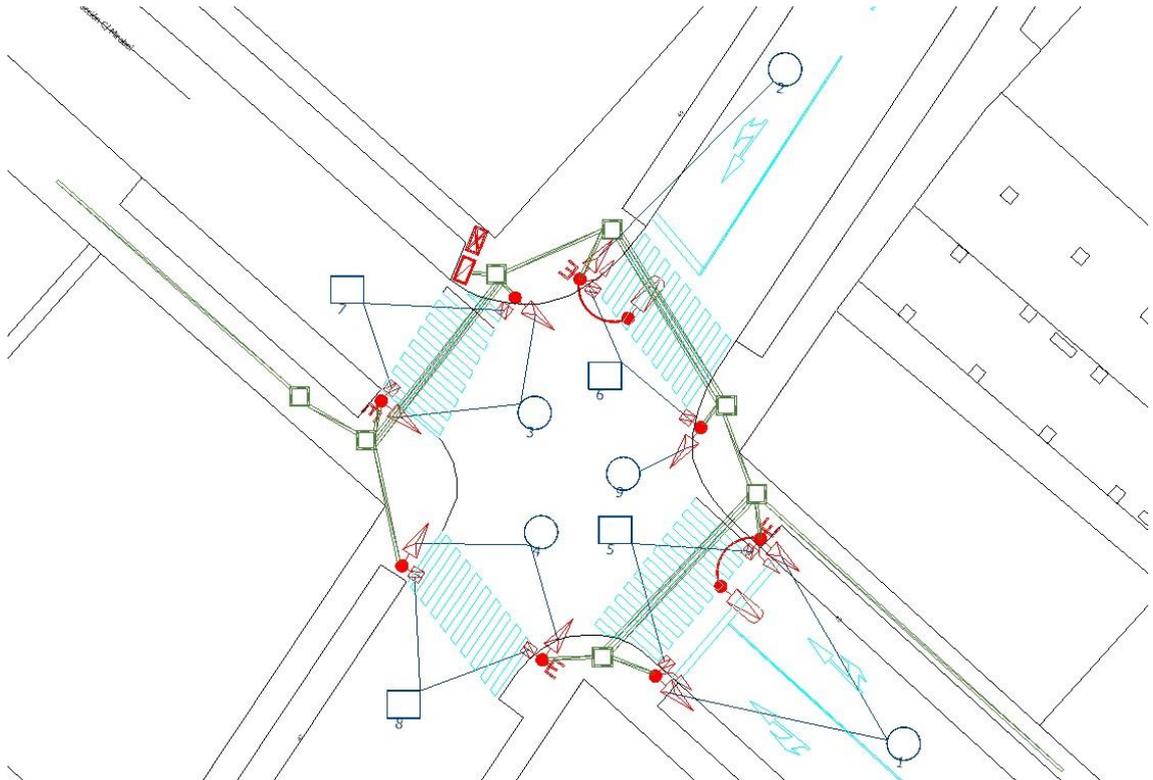


Figura A.25. Cruce 231- C/Soto - C/Portillo de Balboa.

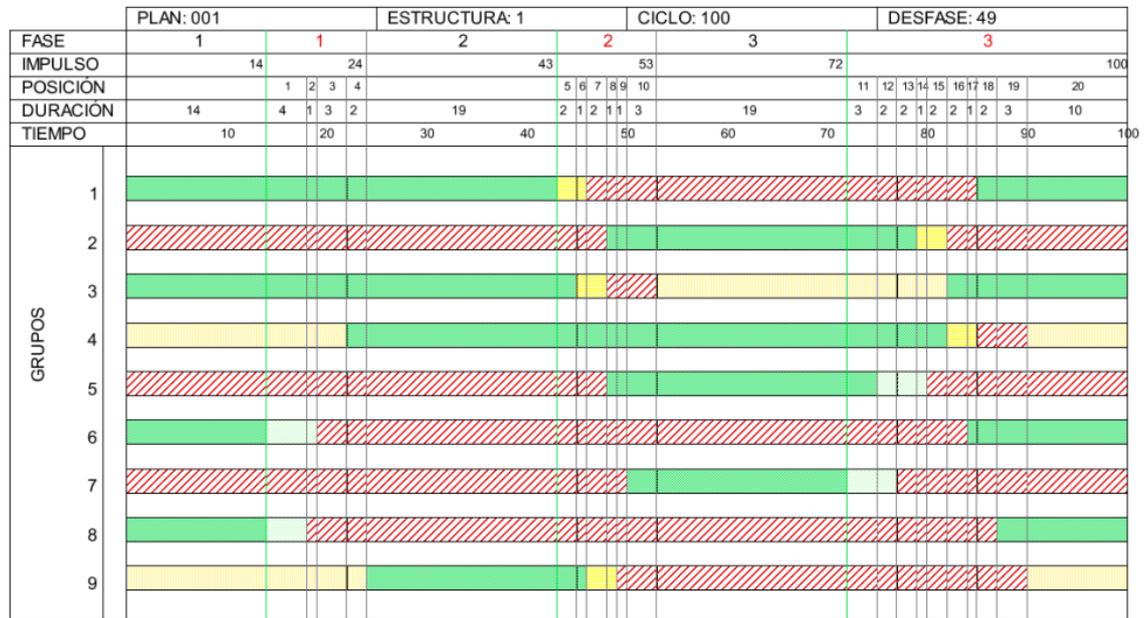


Figura A.26. Diagrama de fases del cruce 231- C/Soto - C/Portillo de Balboa.

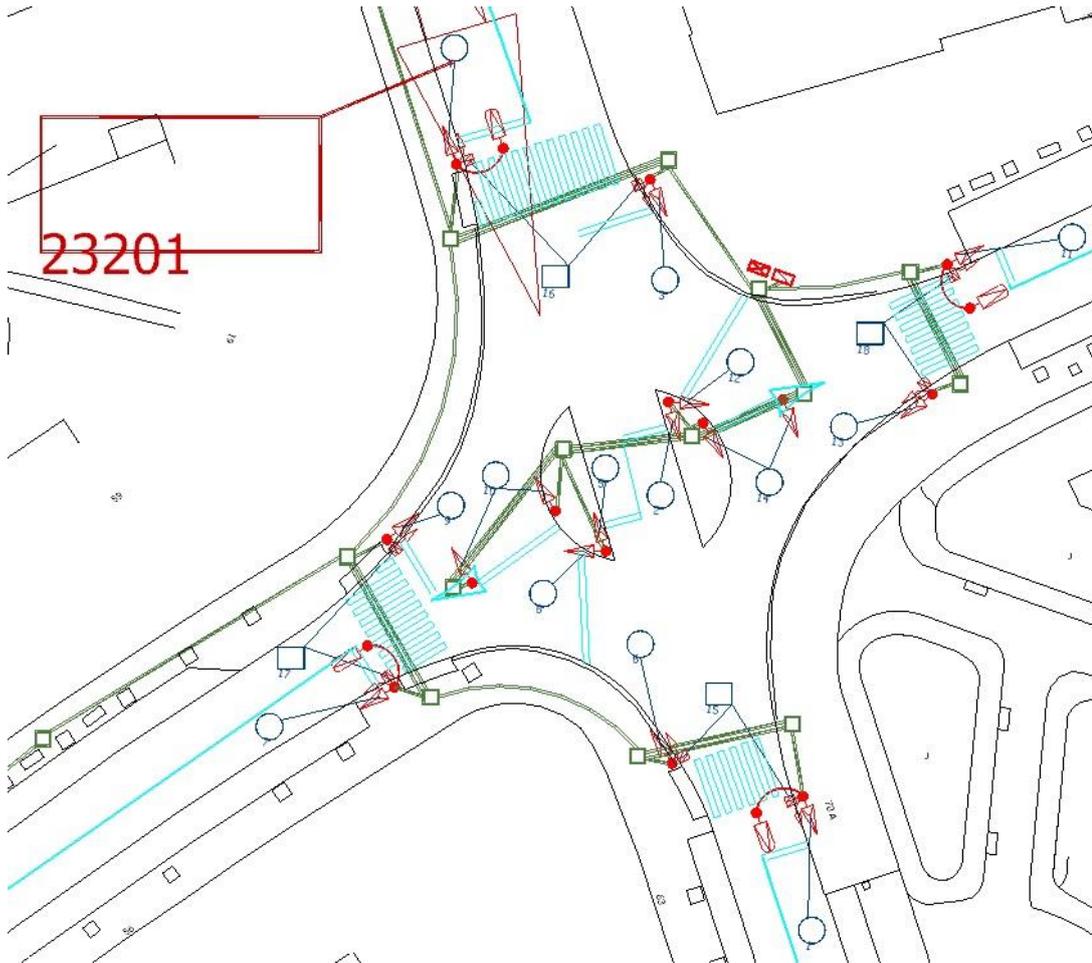


Figura A.27. Cruce 232- C/Cardenal Torquemada - C/Portillo de Balboa.

FASE	PLAN: 001		ESTRUCTURA: 1										CICLO: 100			DESFASE: 84															
	1		1										2	2	3	3															
IMPULSO	11		41										50	54	69	100															
POSICIÓN			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
DURACIÓN	11		5	5	2	5	1	3	1	1	1	1	1	1	3	9	3	1	15	5	4	1	2	3	1	3	1	2	3	1	5
TIEMPO		10	20										30	40	50	60	70	80	90	100											
GRUPOS	1																														
	2																														
	3																														
	4																														
	5																														
	6																														
	7																														
	8																														
	9																														
	10																														
	11																														
	12																														
	13																														
	14																														
	15																														
	16																														
	17																														
	18																														
	19																														
	20																														
	21																														
	22																														
	23																														
	24																														

Figura A.28. Diagrama de fases del cruce 232- C/Cardenal Torquemada - C/Portillo de Balboa.

