



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TRABAJO DE FIN DE MASTER

**INTERACCIÓN DEL DISEÑO Y LA
INFRAESTRUCTURA DE CARRETERAS CON
LOS VEHÍCULOS AUTOMATIZADOS**

Presentado por

Padovani Báez, Pedro Vinicio

Para la obtención del

**Master Universitario en Transporte, Territorio y
Urbanismo**

Curso: 2017/2018

Fecha: 22/06/2018

Tutor: Prof. Alfredo García García



RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1. DEFINICIONES PREVIAS.....	5
2.2. CAPACIDAD TÉCNICA DE LOS SISTEMAS AVANZADOS DE ASISTENCIA AL CONDUCTOR	6
2.2.1. <i>Características de los sistemas</i>	6
2.2.2. <i>Capacidad actual de los sistemas autónomos de conducción</i>	18
2.2.3. <i>Capacidad esperada de los sistemas autónomos de conducción en el medio y largo plazo</i> 31	
2.2.3.1. Capacidad esperada en el medio plazo	31
2.2.3.2. Capacidad esperada a largo plazo	34
2.3. CAPACIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA DE CARRETERAS FRENTE A LOS VEHÍCULOS CON SISTEMAS DE CONDUCCIÓN AUTOMATIZADA	37
2.3.1. <i>Características técnicas de la vía.</i>	39
2.3.2. <i>Características técnicas de la señalización, balizamiento y los sistemas de contención.</i>	46
2.3.3. <i>Gestión de firmes.</i>	51
2.3.4. <i>Normativa.</i>	53
2.4. SEGURIDAD VIAL	53
2.5. PRONOSTICO ECONÓMICO	56
2.6. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE.....	58
3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	59
4. METODOLOGÍA	60
5. RESULTADOS	70
6. ANALISIS.....	75
6.1. COMPORTAMIENTO DEL VEHÍCULO SEMIAUTÓNOMO ANTE CURVAS.....	75
6.2. COMPORTAMIENTO DEL VEHÍCULO SEMIAUTÓNOMO ANTE ACUERDOS CONVEXOS.....	77
6.3. COMPORTAMIENTO DEL VEHÍCULO SEMIAUTÓNOMO ANTE ENTRADAS Y SALIDAS.....	78
7. DISCUSIÓN.....	81
7.1. COMPORTAMIENTO DEL VEHÍCULO SEMIAUTÓNOMO ANTE CURVAS.....	81
7.2. COMPORTAMIENTO DEL VEHÍCULO SEMIAUTÓNOMO ANTE ACUERDOS CONVEXOS.....	83
7.3. COMPORTAMIENTO DEL VEHÍCULO SEMIAUTÓNOMO ANTE ENTRADAS Y SALIDAS	86
8. CONCLUSIÓN DEL ESTUDIO	89
9. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	90
10. PUBLICACIONES RESULTANTES DE ESTA INVESTIGACIÓN	91
11. CONCLUSIÓN	91
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	92
ANEXO I: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y VELOCIDADES AUTOMATIZADAS DE LAS CURVAS OBSERVADAS	
ANEXO II: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS	
ANEXO III: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS ACUERDOS CONVEXOS	

TABLA DE FIGURAS

FIGURA 1. DISEÑO DE VEHÍCULO AUTÓNOMO DE NORMAN BEL GEDDES. FTE. HARRY RAMSON CENTER	2
FIGURA 2. VEHÍCULO AUTÓNOMO DE STANFORD STANLEY GANADOR DEL DARPA CHALLENGE 2005. FTE. DARPA.....	2
FIGURA 3. NIVELES DE AUTOMATIZACIÓN DE LA CONDUCCIÓN. FTE. ADAPTACIÓN HECHA POR LA DGT DE LA SAE J3016.....	3
FIGURA 4. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN AUTÓNOMA. FTE. BASADO EN INFOGRÁFICOS DE D. GONZÁLEZ, PÉREZ, MILANÉS, & NASHASHIBI, 2016; WEI, SNIDER, & DOLAN, 2014	6
FIGURA 5. A) PERCEPCIÓN DEL ENTORNO. B) LOCALIZACIÓN DE LOS OBSTÁCULOS. FTE. WAYMO	7
FIGURA 6. ALGUNOS MODELOS DE CÁMARAS. FTE. NXP SEMICONDUCTORS.....	7
FIGURA 7. MODELOS DE CÁMARAS DE RETROVISOR. FTE. DELPHI	8
FIGURA 8. UBICACIÓN DE CÁMARAS DE RETROVISOR. FTE. MANUAL DE USUARIO BMW SERIE 5.	8
FIGURA 9. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE CÁMARAS EN LOS ADAS. FTE. ELABORACIÓN PROPIA.....	8
FIGURA 10. SENSORES DE ULTRASONIDO / SONAR UTILIZADOS PARA SISTEMAS DE PARQUEO ASISTIDO. FTE. BOSCH.....	9
FIGURA 11. CONFIGURACIÓN USUAL DE LOS SENSORES DE ULTRASONIDO EN SISTEMAS DE PARQUEO. FTE. NEOBOTIX COMPONENTS	9
FIGURA 12. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE SENSORES DE ULTRASONIDO EN LOS ADAS.....	9
FIGURA 13. A) MODELO DE RADAR UTILIZADO PARA ESTOS SISTEMAS. B) ESPECIFICACIONES DE RANGO QUE PUEDE ALCANZAR ESTE RADAR. FTE. DELPHI	10
FIGURA 14. CONFIGURACIÓN DE LOS RADARES. FTE. MANUAL DE USUARIO BMW SERIE 5.	10
FIGURA 15. DIFERENTES RANGOS DEL RADAR Y QUE FUNCIÓN REALIZAN. FTE. AUTOMOTIVE RADARS: A REVIEW OF SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES, PATOLE ET AL., 2017	11
FIGURA 16. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DEL RADAR EN LOS ADAS. FTE. BASADO EN BALAL, PINHASI, & PINHASI, 2016; VOLVO, 2017	12
FIGURA 17. MODELOS DE LIDAR UTILIZADOS. FTE. VELODYNE, NXP SEMICONDUCTORS.....	12
FIGURA 18. DETECCIÓN CON 3D LIDAR DE LOS OBJETOS QUE CONFORMAN EL ENTORNO. FTE. PENDLETON ET AL., 2017.....	13
FIGURA 19. REPRESENTACIÓN DEL MAPEO 3D DE UN LIDAR. FTE. LEDDARTECH	13
FIGURA 20. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE LOS LIDAR EN LOS ADAS.	14
FIGURA 21. ALGUNO DE LOS SENSORES DE LOCALIZACIÓN UTILIZADOS. FTE. NXP SEMICONDUCTORS	14
FIGURA 22. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL Y LOCAL EN LOS ADAS.	15
FIGURA 23. PROCESAMIENTO DEL ENTORNO DE LOS DIFERENTES SENSORES. FTE. LEDDARTECH ...	16
FIGURA 24. ENTENDIMIENTO DEL ENTORNO Y PREDICCIÓN DE LAS POSIBLES RUTAS DE ESOS OBJETOS. FTE. WAYMO	16
FIGURA 25. CONDUCTORA PERMITIENDO QUE EL SISTEMA CONDUZCA POR ELLA. FTE. MOTORPASIÓN	17
FIGURA 26. ACCIÓN DE VEHÍCULO AUTÓNOMO VISTO DESDE EL MAPA DIGITAL. FTE. WAYMO	17
FIGURA 27. ACCIÓN DE VEHÍCULO AUTÓNOMO VISTO DESDE EL MAPA DIGITAL. FTE. WAYMO	18
FIGURA 28. NIVELES DE AUTOMATIZACIÓN ESTABLECIDOS POR LA SAE J3016. FTE. SAE INTERNATIONAL	19
FIGURA 29. NIVELES DE AUTOMATIZACIÓN SEGÚN EL GRADO DE ATENCIÓN DEL CONDUCTOR. FTE. CAR MAGAZINE	19



FIGURA 30. ROL DEL USUARIO Y DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN AUTÓNOMA SEGÚN LOS NIVELES DE AUTOMATIZACIÓN. FTE. ADAPTACIÓN BASADA EN TABLA DEL SAE J3016.	23
FIGURA 31. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL CONTROL DE CRUCERO.	24
FIGURA 32. INDICACIONES EN PANTALLA DE CUANDO EL SISTEMA ESTÁ ACTIVADO. FTE. HYUNDAI ...	24
FIGURA 33. INDICACIÓN EN TABLERO DE CONTROL ADAPTATIVO DE CRUCERO ACTIVADO. FTE. MERCEDES-BENZ	25
FIGURA 34. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL CONTROL DE CRUCERO ADAPTATIVO.....	26
FIGURA 35. PROYECCIÓN DEL RANGO DE LOS RADARES DEL ASISTENTE DE FRENADO ACTIVO. FTE. MERCEDES-BENZ	26
FIGURA 36. A) VISIÓN DE LA CÁMARA DE CONTROL DE PARQUEO. B) MANIOBRA DE APARCAMIENTO DE SISTEMA AUTÓNOMO. FTE. DELPHI	27
FIGURA 37. GUIADO DEL VEHÍCULO POR MARCAS VIALES. FTE. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF MOTOR VEHICLE MANUFACTURERS (OICA)	27
FIGURA 38. MARCAS VIALES EN DETERIORO. FTE. TOMA PROPIA.....	27
FIGURA 39. FUNCIONAMIENTO DE LOS SENSORES COMBINADOS PARA LA OBTENCIÓN DE UN MEJOR GUIADO. FTE. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF MOTOR VEHICLE MANUFACTURERS (OICA) ..	28
FIGURA 40. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL ASISTENTE DE DIRECCIÓN.	28
FIGURA 41. MANIOBRA REALIZADA POR EL ASISTENTE DE ADELANTAMIENTO. FTE. AUTOBILD	28
FIGURA 42. DESCONEXIONES DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN POR MILLAS RECORRIDAS. FTE. BASADO EN LOS REPORTES DE DESCONEXIÓN DEL ESTADO DE CALIFORNIA.....	29
FIGURA 43. CAUSAS DE DESCONEXIÓN DEL SISTEMA. FTE. SHAMMAS, 2017	30
FIGURA 44. ESQUEMA DE CALIFICACIÓN ESTANDARIZADO DE LA CAPACIDAD DE MANTENER EL CONTROL SOBRE LOS SISTEMAS AUTONOMOS (TOC-RATING). FTE. NAUJOKS, WIEDEMANN, SCHÖMIG, JAROSCH, & GOLD, 2018	31
FIGURA 45. BENEFICIOS Y BARRERAS DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN AUTÓNOMA. FTE. CESVIMAP	32
FIGURA 46. IMPACTO DEL PLATOONING EN LA CAPACIDAD DE LA VÍA Y ARMONIZACIÓN DE LAS VELOCIDADES. FTE. USDOT.....	32
FIGURA 47. SUSTITUIR AL CONDUCTOR POR EL SISTEMA REQUIERE DE TIEMPO. FTE. KROSSE ET AL., 2010.....	33
FIGURA 48. PREDICCIONES DE QUE PASARA CON LOS SISTEMAS AUTONOMOS EN LOS PRÓXIMOS AÑOS. FTE. AUTOBILD	33
FIGURA 49. PROYECCIÓN FUTURA DE LOS SISTEMAS DE CONDUCCIÓN. FTE. KROSSE ET AL., 2010..	34
FIGURA 50. ROBOTAXIS DE UBER. FTE. UBER.....	35
FIGURA 51. NAVYA ARMA AUTOBÚS AUTÓNOMO FRANCÉS. FTE. NAVYA TECH	35
FIGURA 52. DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN AUTÓNOMA EN LOS SIGUIENTES AÑOS. FTE. KROSSE ET AL., 2010	36
FIGURA 53. ENTORNO PERCIBIDO POR LOS SENSORES DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN AUTÓNOMA. FTE. MOTORPASIÓN	37
FIGURA 54. INFORMACIÓN REQUERIDA POR EL SISTEMA PARA REALIZAR LAS FUNCIONES DE ASISTENCIA. FTE. ADAPTACIÓN DE TABLA DE EHRlich ET AL., 2016	38
FIGURA 55. CARACTERÍSTICAS DE LA INFRAESTRUCTURA QUE IMPACTAN SOBRE LA SEGURIDAD DEL VEHÍCULO AUTÓNOMO. FTE. "VEHÍCULOS CONECTADOS VEHÍCULOS AUTÓNOMOS," 2017.	38
FIGURA 56. EJEMPLO DE CURVA CIRCULAR. FTE. NORMA 3.1 IC DE TRAZADOS, MINISTERIO DE FOMENTO, 2014A.....	40
FIGURA 57. CURVAS DE ACUERDO O TRANSICIÓN. FTE. NORMA 3.1 IC DE TRAZADO, MINISTERIO DE FOMENTO, 2014A.....	41
FIGURA 58. ACUERDOS VERTICALES. FTE. NORMA 3.1 IC DE TRAZADO, MINISTERIO DE FOMENTO, 2014A.....	41
FIGURA 59. A) COMBINACIÓN CRITICA DE ACUERDO. B) COMBINACIÓN SUGERIDA DE ACUERDO. FTE. BIDULKA ET AL., 2002	42



FIGURA 60. ESQUEMAS DE PERDIDA DE TRAZADO. FTE. NORMA 3.1 IC DE TRAZADO, MINISTERIO DE FOMENTO, 2014A.....	43
FIGURA 61. ESQUEMAS DE PERDIDA DE ORIENTACIÓN. FTE. NORMA 3.1 IC DE TRAZADO, MINISTERIO DE FOMENTO, 2014A.....	43
FIGURA 62. ESQUEMAS DE PERDIDA DINÁMICA. FTE. NORMA 3.1 IC DE TRAZADO, MINISTERIO DE FOMENTO, 2014A.....	44
FIGURA 63. ESQUEMAS DE SITUACIONES COMBINADAS. FTE. NORMA 3.1 IC DE TRAZADO, MINISTERIO DE FOMENTO, 2014A.....	44
FIGURA 64. ESQUEMA PARA ALERTAR UNA DESCONEXIÓN EN CASOS DE ESTE TIPO. FTE. HYUNDAI..	45
FIGURA 65. VISIBILIDAD EN PLANTA DE CURVAS CIRCULARES. FTE. NORMA 3.1 IC DE TRAZADO, MINISTERIO DE FOMENTO, 2014A.....	45
FIGURA 66. ESQUEMA DE MARCAS VIALES SEGÚN CANTIDAD DE CARRILES Y SENTIDO. FTE. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS 8.1 IC: MARCAS VIALES, MINISTERIO DE FOMENTO, 1987	47
FIGURA 67. PERCEPCIÓN DE SEÑALIZACIÓN VERTICAL. FTE. ITS INTERNATIONAL	48
FIGURA 68. ESQUEMA DE MARCAS VIALES. FTE. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS 8.1 IC: MARCAS VIALES, MINISTERIO DE FOMENTO, 1987	48
FIGURA 69. SALIDA CV-35, VALENCIA, ESPAÑA. FTE. GOOGLE EARTH	49
FIGURA 70. ENTRADA A CARRETERA 648, FRANKFURT, ALEMANIA. FTE. GOOGLE EARTH.....	49
FIGURA 71. SALIDA DE LA A12, BRUSELAS, BÉLGICA. FTE. GOOGLE EARTH	50
FIGURA 72. SALIDA DE LA A1, NÁPOLES, ITALIA. FTE. GOOGLE EARTH	50
FIGURA 73. SALIDA DE LA 2, SUIZA. FTE. GOOGLE EARTH.....	51
FIGURA 74. AFECCIONES DEL PAVIMENTO. FTE. ROADSCANNERS	52
FIGURA 75. SELLADO DE FISURAS LONGITUDINALES DEL PAVIMENTO.	52
FIGURA 76. INFOGRÁFICO DE SINIESTRALIDAD DURANTE EL 2017 (NO SE INCLUYEN VALORES DE CATALUÑA NI DEL PAÍS VASCO). FTE. DGT	54
FIGURA 77. FACTORES CONTRIBUYENTES A LOS ACCIDENTES OCURRIDOS EN EL 2017. FTE. DGT ..	54
FIGURA 78. VISIÓN DE LA MOVILIDAD CONECTADA Y AUTÓNOMA EN ESPAÑA. FTE. REVISTA RUTAS. TOMÁS MARTÍNEZ ET AL., 2017	55
FIGURA 79. MOVILIDAD AUTOMATIZADA VS. VEHÍCULO PERSONAL: PROYECCIÓN DE COSTOS A 20 AÑOS. FTE. JOHNSON & WALKER, 2016	56
FIGURA 80. POSIBLES APLICACIONES DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS COMO PARTE DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO DIVERSIFICADO. FTE. UITP	57
FIGURA 81. INDICADORES DE QUE EL SISTEMA DE SEGUIMIENTO ESTÁ ACTIVO. FTE. BMW	60
FIGURA 82. UBICACIÓN DE CÁMARAS DE RETROVISOR INTERIOR. FTE. BMW	60
FIGURA 83. AVISO AL CONDUCTOR DE PONER MANOS SOBRE VOLANTE. FTE. BMW	61
FIGURA 84. CÁMARA GARMIN VIRB ELITE Y SOPORTE UTILIZADOS. FTE. ELABORACIÓN PERSONAL ..	61
FIGURA 85. A) UBICACIÓN DE LA CÁMARA DE VIDEO. B) CAMPO VISUAL CAPTADO POR LA CÁMARA. FTE. ELABORACIÓN PERSONAL	61
FIGURA 86. LOCALIZACIÓN DE LAS CURVAS ANALIZADAS (1). FTE. GOOGLE EARTH	62
FIGURA 87. LOCALIZACIÓN DE LAS CURVAS ANALIZADAS (2). FTE. GOOGLE EARTH	62
FIGURA 88. LOCALIZACIÓN DE ENTRADAS OBSERVADAS. FTE. GOOGLE EARTH	63
FIGURA 89. LOCALIZACIÓN DE ENTRADAS OBSERVADAS (2). FTE. GOOGLE EARTH.....	63
FIGURA 90. LOCALIZACIÓN DE SALIDAS OBSERVADAS (1). FTE. GOOGLE EARTH	64
FIGURA 91. LOCALIZACIÓN DE SALIDAS OBSERVADAS (2). FTE. GOOGLE EARTH	64
FIGURA 92. LOCALIZACIÓN DE LOS TRAMOS CON ACUERDOS CONVEXOS OBSERVADOS. FTE. GOOGLE EARTH	65
FIGURA 93. LOCALIZACIÓN DE LOS TRAMOS CON ACUERDOS CONVEXOS OBSERVADOS. FTE. GOOGLE EARTH	65
FIGURA 94. LOCALIZACIÓN DE LOS TRAMOS CON ACUERDOS CONVEXOS OBSERVADOS. FTE. GOOGLE EARTH	66



FIGURA 95. LOCALIZACIÓN DE LOS TRAMOS CON ACUERDOS CONVEXOS OBSERVADOS. FTE. GOOGLE EARTH	66
FIGURA 96. LOCALIZACIÓN DE LOS TRAMOS CON ACUERDOS CONVEXOS OBSERVADOS. FTE. GOOGLE EARTH	66
FIGURA 97. MÉTODO DE MEDICIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS UTILIZADO. FTE. GOOGLE EARTH	67
FIGURA 98. . VANO EN LAS MARCAS VIALES DE ENTRADAS Y SALIDAS EXIGIDOS POR LA NORMA. FTE. NORMA 8.2 IC: MARCAS VIALES	71
FIGURA 99. RESULTADOS DE LAS OBSERVACIONES DE CONTROL DE LA CONDUCCIÓN SEMIAUTÓNOMA EN LAS MARCAS VIALES DE ENTRADAS Y SALIDAS.	71
FIGURA 100. VELOCIDAD MÁXIMA ALCANZADA CON CONDUCCIÓN SEMIAUTÓNOMA EN FUNCIÓN AL RADIO DE LAS CURVAS.	72
FIGURA 101. VELOCIDAD MÁXIMA ALCANZADA CON CONDUCCIÓN SEMIAUTÓNOMA EN FUNCIÓN AL CCR DE LAS CURVAS.....	73
FIGURA 102. NOMOGRAMA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS DISTANCIAS DE VISIBILIDAD EN FUNCIÓN DEL Kv Y LA VELOCIDAD DE PROYECTO.	74
FIGURA 103. VELOCIDAD AUTOMATIZADA (AS) EN FUNCIÓN AL RADIO DE LAS CURVAS OBSERVADAS.	75
FIGURA 104. VELOCIDAD AUTOMATIZADA (AS) EN FUNCIÓN DEL CCR DE LAS CURVAS OBSERVADAS.	76
FIGURA 105. FUNCIONAMIENTO DEL NOMOGRAMA RESULTANTE DEL ANÁLISIS DE DISTANCIAS DE VISIBILIDAD.	77
FIGURA 106. LONGITUD PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA LONGITUD DE VANO SIN MARCA VIAL QUE CEDE EL CONTROL EN SALIDAS Y ENTRADAS	79
FIGURA 107. LONGITUD MEDIA DEL VANO SIN MARCA VIAL EN LA QUE EL SISTEMA AUTÓNOMO CEDE EL CONTROL EN SALIDAS Y ENTRADAS EN FUNCIÓN DEL ELEMENTO GEOMÉTRICO DE LA VÍA.	79
FIGURA 108. CONFRONTACIÓN DE LA VELOCIDAD AUTOMATIZADA (AS) CON LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN (V85) Y LA DE DISEÑO EN FUNCIÓN DEL RADIO DE LA CURVA.	81
FIGURA 109. PROPUESTA DE SEÑALIZACIÓN PARA EL NIVEL DE SERVICIO DE LA CONDUCCIÓN AUTOMATIZADA.	82
FIGURA 110. DISTANCIAS DE VISIBILIDAD DISPONIBLES RESULTANTES DE LAS ITERACIONES DEL NOMOGRAMA.	84
FIGURA 111. TIEMPOS DE PERCEPCIÓN Y REACCIÓN EN LOS QUE AÚN HAY DISTANCIA DE VISIBILIDAD DISPONIBLE.	85
FIGURA 112. PROPUESTA DE PROLONGACIÓN DE LAS MARCAS VIALES DE SEPARACIÓN EN CARRILES DE CAMBIO DE VELOCIDAD DIRECTO.	86
FIGURA 113. PROPUESTA DE PROLONGACIÓN DE LAS MARCAS VIALES DE SEPARACIÓN DE CARRIL DE CAMBIO DE VELOCIDAD EN PARALELO.	87
FIGURA 114. PROPUESTA DE MARCAS VIALES DISCONTINUAS DE PROLONGACIÓN DEL BORDE DE CALZADA EN SALIDAS Y ENTRADAS SIN CARRIL DE CAMBIO DE VELOCIDAD	87
FIGURA 115. PROPUESTA DE PROLONGACIÓN DE MARCA VIAL DISCONTINUA DE SEPARACIÓN DE CARRILES EN AUMENTOS O PERDIDAS DE CARRILES.	88

RESUMEN

El presente trabajo muestra la interacción del diseño y la infraestructura de carreteras con los vehículos automatizados. La aparición de los vehículos automatizados ha supuesto un importante avance que ha ido revolucionando no solo la tecnología, sino también el transporte y su infraestructura. La conducción semiautónoma se basa principalmente en el guiado de las marcas viales mediante un procesamiento digital de imágenes, lo que nos lleva a pensar si las infraestructuras actualmente están preparadas para estos vehículos. Debido a la entrada de los vehículos autónomos surge la necesidad de que las infraestructuras viales sean compatibles con estos nuevos sistemas.

Para ello, se han realizado observaciones en más de 2,000 km de diversas autovías, carreteras multicarril y carreteras convencionales, observando 184 curvas, incluyendo ambos sentidos de circulación como curvas distintas, también 44 salidas y 41 entradas, entre ambos sentidos, y también 24 acuerdos convexos. Se realizaron observaciones de las localizaciones en donde el vehículo semiautónomo cedía el control al conductor y qué factores influían (pérdida de guiado por marca vial de borde, geometría de la vía, etc.). Como resultado se ha encontrado una correlación entre la geometría de la vía y la velocidad máxima a la que puede operar un vehículo semiautónomo sin ceder el control. De igual forma se concluye que la vigente norma de marcas viales presenta limitaciones para facilitar la continuidad de funcionamiento de la conducción semiautónoma, al disponer de huecos sin marca vial discontinua longitudinal en entradas y salidas. Así mismo, se concluye que existe una limitación entre la geometría y la distancia de visibilidad normativa de acuerdos convexos y el funcionamiento de los vehículos semiautónomos.

A partir de esta investigación surge un nuevo concepto de velocidad: velocidad segura de conducción automatizada, el cual se encontró que es inferior a las velocidades de diseño, operación y reglamentarias. Así mismo, surge un nuevo concepto de consistencia de la conducción automatizada que considera las diferencias entre las expectativas de los conductores y la velocidad automatizada. Se define un nivel de servicio de la conducción automatizada para paliar las inconsistencias encontradas, el cual será previamente acreditado para cada tramo de carretera, y luego se informará a los conductores. También, se propone la eliminación de los huecos sin marcas viales, para favorecer la continuidad de guiado de la conducción automatizada. Por otra parte, se obtuvo que la distancia de visibilidad disponible del radar con tiempos de percepción y reacción de 0 a 0.7 segundos se equipara a la visibilidad de parada según la norma de diseño, para la misma velocidad.

Palabras clave: Vehículo automatizado, carretera, marca vial, conducción semiautónoma, seguridad vial, velocidad, velocidad automatizada, consistencia de la conducción automatizada, nivel de servicio para conducción automatizada.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de vehículos autónomos se podría llegar a pensar que el mismo es un concepto nuevo, que puede ser una idea que surgió en estos últimos años con los avances de las tecnologías, pero no es así. Los planteamientos de los sistemas de conducción automatizada vienen apareciendo de forma teórica desde los años 1920, no fue hasta 1939 – 1940 durante la feria Futurama, patrocinada este año por General Motors en la que fue expuesto por Norman Bel Geddes el primer prototipo de vehículo autónomo conocido, el mismo era un coche de control por radio y un circuito eléctrico (Morgan Stanley, 2013).

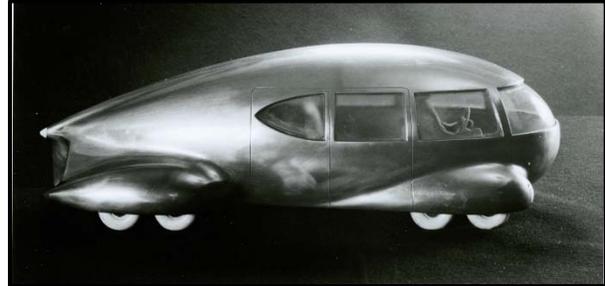


Figura 1. Diseño de vehículo autónomo de Norman Bel Geddes. Fte. Harry Ramson Center

A partir de esto fueron surgiendo intentos independientes para la construcción de más coches de este tipo en Estados Unidos, Japón y Europa, desde la década de 1950 hasta la década de 1980. La gran mayoría de estos vehículos “autónomos” completaron las pruebas a los que fueron sometidos en el momento, pero no lograron ser probados nunca en condiciones de tráfico real.

El gran avance que llevo a la conducción autónoma fuera de los márgenes de todos los programas de desarrollos anteriores fue el gran reto establecido por la compañía DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) quienes luego de la creación de su vehículo autónomo en la década de los 1980, organizo una competencia en 2004 en la que muchas universidades y compañías de desarrollo de tecnología participaron. No fue hasta 2005 que esta competencia alcanzo su cometido de ver un vehículo autónomo completar las pruebas (un recorrido de 132 millas de conducción automatizada, les tomo casi 7 horas en completar el reto), el ganador de este reto para ese entonces fue Stanford Stanley (Thrun et al., 2006).



Figura 2. Vehículo autónomo de Stanford Stanley ganador del DARPA challenge 2005. Fte. DARPA

En 2009 el profesor de la Universidad de Stanford Sebastian Thrun fue designado para desarrollar el proyecto del vehículo autónomo de google actualmente Waymo. La primera prueba registrada de estos vehículos de google fue realizada en mayo del 2012 obteniendo los resultados deseados para un entorno controlado.

En Estados Unidos, en el año 2013, la NHTSA lanzo un sistema de clasificación formal para la automatización de vehículos, el cual abandonó más adelante para adoptar el sistema de clasificación de niveles de automatización planteado por la SAE J3016 en 2014 que se basa en la cantidad de intervención y atención del conductor requerida en lugar de las capacidades del vehículo como había planteado la NHTSA inicialmente (SAE, 2016; SAE International, 2014, 2016).

La escala de niveles de automatización que establece la SAE internacional, hoy en día está siendo adoptada por la mayoría de países que están introduciendo estos sistemas en sus carreteras. Esta escala consta de 6 niveles de automatización, siendo el 0 la conducción exclusivamente manual, y el 5 una conducción totalmente automatizada (ver Figura 3). Actualmente los vehículos que se encuentran en el mercado pueden alcanzar los niveles 2 y 3 de automatización en dominios operacionales controlados y entornos como autopistas con buenas características. Se considera que estos vehículos de nivel 2 y 3 son de conducción semiautónoma ya que facilitan la misma.

NIVEL	DENOMINACION	DEFINICION	TAREAS DE CONDUCCION		CONDUCCION LONGITUDINAL (ACELERAR/FRENAR) Y LATERAL (DIRECCION)	CONTROL DEL ENTORNO	RECUPERACION DE LAS TAREAS DE CONDUCCION EN CASO DE CONTINGENCIA	TAREAS DE CONDUCCION REALIZADAS POR EL SISTEMA
			CONDUCTOR	SISTEMA				
0	SIN AUTOMATIZACION	El conductor realiza continuamente todas las tareas asociadas a la conducción, incluso cuando son mejoradas a través de algún aviso o la intervención de sistemas.	El conductor realiza continuamente la tarea de conducción dinámica lateral y longitudinal.	N/A	CONDUCTOR	CONDUCTOR	CONDUCTOR	N/A
1	CONDUCCION ASISTIDA	El sistema de ayuda a la conducción desarrolla una tarea específica, bien realiza la conducción dinámica lateral o longitudinal utilizando la información del entorno del vehículo, mientras que el conductor realiza el resto de tareas de conducción.	El conductor realiza continuamente la tarea de conducción dinámica lateral o longitudinal.	El sistema realiza la conducción longitudinal o lateral que no esté realizando el conductor.	CONDUCTOR Y SISTEMA	CONDUCTOR	CONDUCTOR	ALGUNAS
2	CONDUCCION PARCIALMENTE AUTOMATIZADA	El sistema de ayuda a la conducción desarrolla la conducción dinámica lateral y longitudinal utilizando la información del entorno del vehículo, mientras que el conductor realiza el resto de tareas de conducción.	Supervisión de las tareas de conducción dinámica y el entorno.	Conducción longitudinal y lateral en un caso de uso definido.	SISTEMA	CONDUCTOR	CONDUCTOR	ALGUNAS
3	CONDUCCION AUTOMATIZADA CONDICIONADA	El sistema de conducción automatizada desarrolla todas las tareas de la conducción con la expectativa de que el conductor responda adecuadamente a la petición de intervención por parte de éste.	No es necesaria la supervisión constante de la conducción automatizada pero siempre debe estar en una posición adecuada para reanudar el control.	Conducción longitudinal y lateral en un caso de uso definido. Reconoce sus límites de rendimiento y pide al conductor reanudar la tarea de conducción dinámica con margen de tiempo suficiente.	SISTEMA	SISTEMA	CONDUCTOR	ALGUNAS
4	CONDUCCION ALTAMENTE AUTOMATIZADA	El sistema de conducción automatizada desarrolla todas las tareas de la conducción, incluso si el conductor no responde adecuadamente a la petición de intervención por parte de éste.	El conductor no es requerido durante el caso de uso.	Conducción longitudinal y lateral en todas las situaciones de un caso de uso definido.	SISTEMA	SISTEMA	SISTEMA	ALGUNAS
5	CONDUCCION PLENAMENTE AUTOMATIZADA	El sistema de conducción automatizada desarrolla todas las tareas de la conducción bajo todas las circunstancias de la vía y ambientales.	N/A	Conducción longitudinal y lateral en todas las situaciones encontradas durante toda la prueba. No se requiere conductor.	SISTEMA	SISTEMA	SISTEMA	TODAS

Figura 3. Niveles de Automatización de la conducción. Fte. Adaptación hecha por la DGT de la SAE J3016

Los sistemas autónomos de conducción deben ser capaces de tomar el control del vehículo, dentro de un dominio operacional, de forma continua y sostenida durante el tiempo. El funcionamiento de este sistema se basa en el control de: controlar la trayectoria, velocidad, posición, aceleración/deceleración, y una correcta comunicación con su entorno. Un sistema que cumpla con todo lo anterior y sea capaz de dar respuesta a cualquier situación que surja durante su desplazamiento, se podría considerar que el mismo se corresponde a los niveles 4 – 5 de automatización. Si el sistema necesita de la presencia activa de un conductor para que el mismo supervise – colabore en la operación del sistema y que ante cualquier incidente que se presente el conductor tome el control, se considera un sistema semiautónomo y se correspondería a los niveles 2 – 3.

El futuro de los vehículos autónomos no está en solo la conducción de estos, sino en la coordinación y la cooperación que es necesaria para que estos sistemas sean capaces de realizar maniobras complejas ante incidentes. Los vehículos autónomos son un hecho ya, son parte del tráfico, y para afrontar esta realidad de la mejor manera. En este trabajo de final de master se confrontan los sistemas de conducción automatizada con la capacidad técnica de la infraestructura actual de la carretera. Las carreteras actuales presentan una geometría que



condiciona la velocidad y la visibilidad disponible de la vía, presentan sistemas de señalización y balizamiento pensados para conducción manual, sistemas de contención y pavimentos, todos pensados para ser procesados y circulados por la conducción manual. Estos ámbitos son los principales y los que dan la capacidad técnica de la vía.

Teniendo en cuenta que para el desarrollo de este trabajo se contaba con un vehículo semiautónomo, surge la oportunidad de investigar de forma experimental cómo es la interacción entre la infraestructura actual de la vía y estos vehículos. El trabajo estará centrado principalmente en los aspectos geométricos de la vía y los aspectos de señalización. Mediante la confrontación del sistema semiautónomo con las diferentes situaciones de la carretera se observará como afectan estas al correcto funcionamiento del vehículo semiautónomo. Se observarán y se confrontarán los parámetros de velocidad, curvatura, cambios de curvatura, discontinuidades e inconsistencias. Se planteará una metodología para realizar dichas observaciones y, se realizarán las pruebas en distintos tipos de carreteras con la finalidad de obtener una aproximación a la posible correlación entre estos parámetros y el funcionamiento del vehículo.

Mediante este proceso experimental esperábamos primero, observar una correlación entre la geometría de la vía y la velocidad máxima a la que el vehículo semiautónomo puede circular. En segundo lugar, esperábamos observar una correlación entre la continuidad de las marcas viales de guiado y la disminución de las cesiones de control al conductor del sistema semiautónomo. Y en tercer lugar esperábamos obtener resultados claves que ayudaran a ofrecer propuestas de mejora de la vía para que los sistemas autónomos de conducción pudieran circular de manera más segura. Así mismo, se esperaba encontrar la distancia de visibilidad disponible para estos vehículos, y contrastarlos con los requerimientos de la norma.



2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Definiciones Previas

Antes de iniciar a describir las características de los vehículos autónomos y sus componentes se debe de conocer la definición técnica de cada uno de estos, Siguiendo esto y guiándonos de las definiciones publicadas por la Dirección General de Tránsito (DGT, 2015) y otras investigaciones las definiciones son las siguientes:

Autónomo: Término que hace referencia a los sistemas que tienen la capacidad y autoridad de toma de decisiones de forma independiente. Este término no solo abarca la toma de decisiones, sino también que representa la funcionalidad completa del sistema en cuestión.

Asistencia al conductor: el conductor controla permanentemente el control lateral o longitudinal. La otra tarea puede ser automatizada hasta cierto punto por el sistema de asistencia.

Los sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS): son sistemas electrónicos para mejorar la conducción con respecto a la seguridad, la comodidad y la economía. Dichos sistemas se basan comúnmente en la información del sensor sobre el estado del sistema y el entorno. El rango de detección depende en gran medida del tipo de sensor utilizado, así como del fabricante del sensor.

Dominio operacional: Según SAE International, 2014 es Cuando el sistema cumple con las condiciones específicas para la que fue diseñado para funcionar.

Sistema semiautónomo de conducción: es todo aquel sistema capaz de tomar el control del vehículo, dentro de un dominio operacional dado. Este sistema necesita de la presencia activa del conductor para que el mismo supervise y colabore en caso de cualquier incidencia pueda el mismo tomar el control del sistema.

Sistema Autónomo de conducción (ADS): Es todo aquel sistema capaz de tomar el control del vehículo, dentro de un dominio operacional dado, de manera continua y sostenida durante un tiempo dado. Así mismo, tiene la capacidad de dar respuesta a cualquier circunstancia que surja dentro de su área de desplazamiento.

Desconexiones: Describen incidentes en los que el conductor humano anula el sistema autónomo o el vehículo solicita intervención.

Platooning: Es la reducción de las distancias entre los vehículos mediante una conexión de los sistemas autónomos que permite que estos vehículos se mantengan a una distancia mínima entre ellos, recorran la vía a la misma velocidad sin ninguna parada de por medio hasta llegar a su destino, esto con la finalidad de aumentar la capacidad de la vía.(Anderson et al., 2016; Fernandes, Nunes, & Member, 2012)

2.2. Capacidad técnica de los sistemas Avanzados de Asistencia al conductor

2.2.1. Características de los sistemas

Los sistemas de Conducción automatizada según el artículo “Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies” Bagloee, Tavana, Asadi, & Oliver, 2016 y el artículo “Perceiving and understanding the world for ADAS and Autonomous” Labaziewicz, 2016 cumplen con 3 funciones principales de diseño las cuales son: **Percibir** todo lo que los rodea (luz natural, luz artificial, condiciones atmosféricas, vehículos, peatones, etc.), **Entender** las diferentes variables actuantes en lo que el mismo acaba de percibir (distancia, velocidad, etc.), y **Actuar** en respuesta a estos. (Barell et al., 2016)

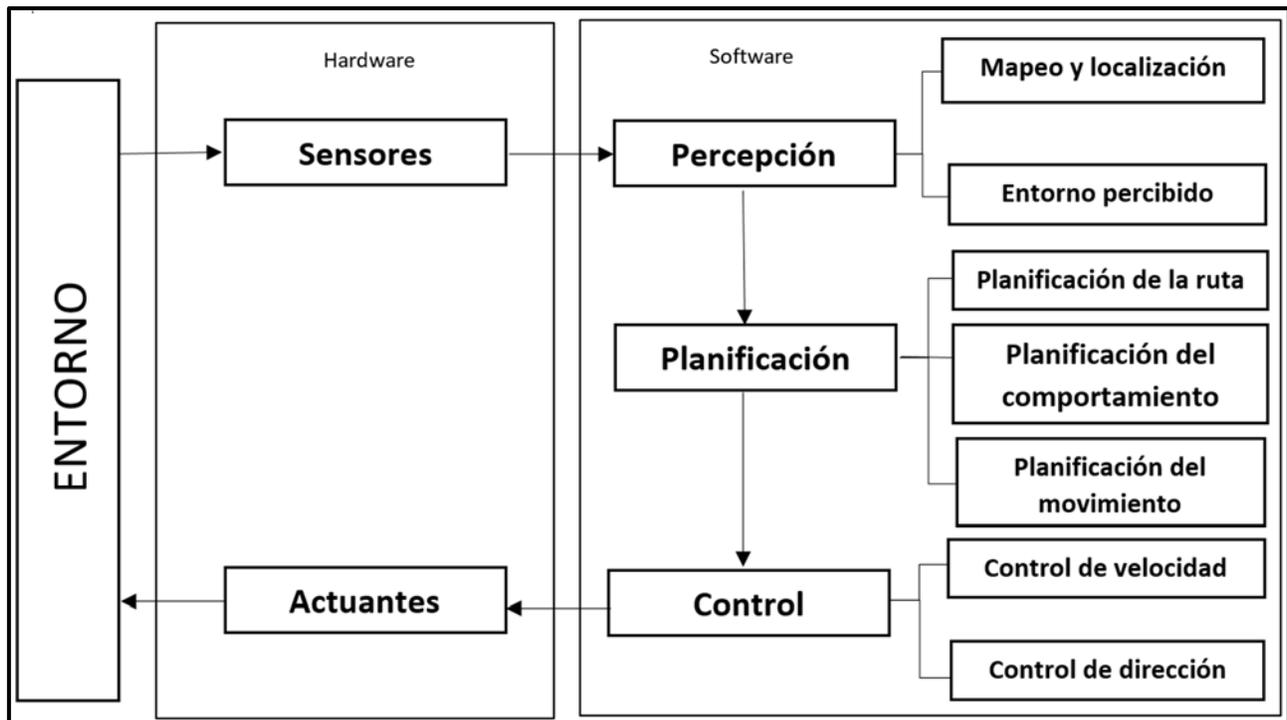


Figura 4. Esquema de funcionamiento del sistema de conducción autónoma. Fte. Basado en infográficos de D. González, Pérez, Milanés, & Nashashibi, 2016; Wei, Snider, & Dolan, 2014

Estas funciones son las premisas de muchos sistemas robóticos, y cada una de esta cuenta con una serie de sensores y otros sistemas de información para lograr su objetivo. A continuación, se detallarán los diferentes sensores y sistemas de información utilizados para la recolección de los datos para el desarrollo de cada función:

Percepción y Localización:

Se trata de que el vehículo en cuestión perciba el entorno vial circundante gracias a los sensores externos y otros sistemas de información (cámaras, radares, LIDAR, etc.). Que el vehículo puede reproducir toda la escena que lo rodea en un radio de acción entre 100-150 m, y así situar obstáculos, objetos móviles o fijos, estimar distancias de visibilidad, leer señalizaciones viales y localizar los demás vehículos de manera efectiva y precisa.



Figura 5. a) Percepción del entorno. b) Localización de los obstáculos. Fte. Waymo

Sensores y otros sistemas de información.

Los equipos integrantes para hacer posible la percepción del ambiente circundante son:

- **Cámaras:**

Cámaras de luz visible, Cámaras infrarrojas, Cámaras térmicas, y las mismas varían según su capacidad de calidad de imagen y su velocidad de procesado. (Delphi, 2009b, 2011)

Estos sistemas de recopilación de imágenes en tiempo real cumplen con un objetivo específico para estos sistemas, este objetivo es el de detectar la señalización horizontal y vertical de la vía (cámara de luz visible); detectar peatones, ciclistas, objetos móviles o fijos y animales (Cámara de luz visible + Cámara infrarroja o térmica); determinar distancias y trayectorias en los objetos detectados. (Cameras, Lin, Ke, Liu, & Liao, 2014; Campbell, 2015; Ors, 2017)



Figura 6. Algunos modelos de cámaras. Fte. NXP Semiconductors

Estos Hardware de imagen trabajando en conjunto con el software y tienen la capacidad de crear un mapa del área en la que se encuentran circulando. Estos sensores son la base de la integración con la vía y la clasificación de los elementos de la misma.

Las cámaras con los años han evolucionado gracias a las nuevas tecnologías, y debido a estos avances en las tecnologías las cámaras de video poseen un amplio rango de distancias, llegando a ser desde milimétricas hasta kilométricas (según capacidad de sensor, lentes utilizados y sensibilidad de la misma). Según lo que se quiera captar se necesitaran una o más cámaras en diferentes posiciones cada una con la configuración necesaria para cumplir su función.

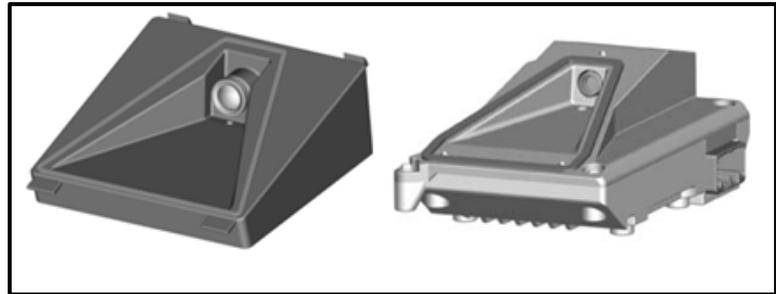


Figura 7. Modelos de cámaras de retrovisor. Fte. Delphi

En los sistemas actuales de procesamiento de imagen en la actualidad el rango de la cámara de video depende más del software de tratamiento de imágenes que de la calidad, lentes y sensibilidad del sensor. En los sistemas actuales de procesamiento de imágenes se cuenta con una capacidad de detectar objetos que rondan los 200 – 300 metros de distancia, aunque la mayoría de los sistemas solo alcanzan con un alto grado de precisión distancias entorno a los 80 – 100 metros. (Eidehall, 2004; Fang & Wang, 2017; Hughes, Glavin, Jones, & Denny, 2008)

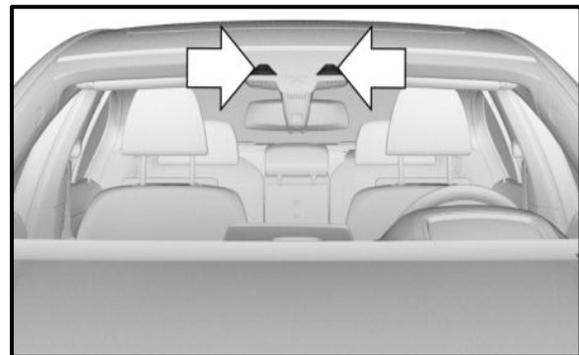


Figura 8. Ubicación de cámaras de retrovisor. Fte. Manual de Usuario BMW Serie 5.

Este tipo de sensores tiene las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Son de bajo costo en comparación a otros sensores. • Son clave como parte del núcleo que integra los demás sensores. • Puede distinguir colores y texturas, siendo esta la clave para el reconocimiento de la señalización de la vía. • Posible clasificación entre los usuarios y los elementos varios de la vía. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altamente sensible tanto para las condiciones meteorológicas como para condiciones de alta o baja iluminación. • Por su ubicación tiende a acumular sucio en el sensor. • Su capacidad de determinar distancias y desplazamientos con respecto a otros sensores es baja.

Figura 9. Ventajas y desventajas del uso de cámaras en los ADAS. Fte. Elaboración propia

- **Ultrasonido/Sonar:**

Se usa principalmente para calcular la distancia y/o dirección de un objeto desde el tiempo que le toma a una onda de sonido viajar hasta el objetivo y volver. Este sensor es útil en los sistemas electrónicos debido a sus características, la más importante de estas es que las ondas y las vibraciones del sensor se pueden dirigir a conveniencia, por ejemplo, los sensores de parqueo de los vehículos cuentan con este sistema y el mismo genera una presión de sonido de 100dB para asegurar que el sistema reciba claramente los datos. (Hikita, 2010)



Figura 10. Sensores de ultrasonido / sonar utilizados para sistemas de parqueo asistido. Fte. Bosch

Inicialmente estos sensores eran utilizados solo para detectar obstáculos cuando los vehículos se estaban aparcando, sin embargo, hoy en día ha evolucionado y ha formado parte clave para el sistema de aparcado autónomo.

Los sensores de aparcamiento pueden estar ubicados en la parte de delante del vehículo, en la parte de detrás, o en ambas partes. En estos casos pueden detectar obstáculos de hasta 2.5 metros (según fabricante del sensor).



Figura 11. Configuración usual de los sensores de ultrasonido en sistemas de parqueo. Fte. Neobotix components

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Tienen a ser de bajo costo. • No dependiente de las condiciones adversas (meteorológicas, iluminación, sucio, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Debido a las frecuencias manejadas por el sensor y los modelos actuales los mismos no poseen un rango amplio de distancias de reconocimiento. • Al no ser un sensor de imagen, el mismo solo detecta el obstáculo pero no distingue la naturaleza del mismo.

Figura 12. Ventajas y desventajas del uso de sensores de ultrasonido en los ADAS.

- **Radar.**

Los sistemas de radar automotriz son responsables de la detección de objetos y obstáculos, su posición y velocidad relativa al vehículo. El desarrollo del procesamiento de señales técnicas junto con el progreso en los semiconductores milimétricos de onda (onda mm) juega un papel clave en los sistemas de radar automotriz. Varias técnicas de procesamiento de señal han sido desarrolladas para proporcionar una mejor resolución y estimación en todas las mediciones de dimensiones: rango, ángulos azimut-elevación, y la velocidad de los objetivos que rodean los vehículos. (Digi-key electronics, 2016; Patole, Torlak, Wang, & Ali, 2017; Robertson, Brett, & Reuter, 2010)

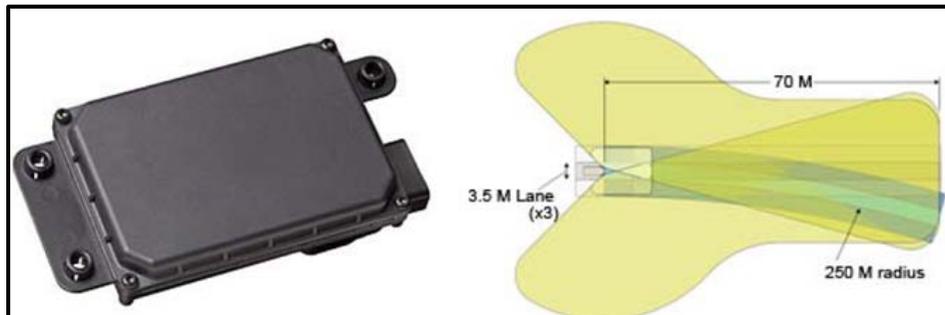


Figura 13. a) Modelo de radar utilizado para estos sistemas. b) Especificaciones de rango que puede alcanzar este radar. Fte. Delphi

Tanto vehículos autónomos como conducidos por humanos utilizan cada vez más radares para mejorar la comodidad y la seguridad de los conductores. Por ejemplo, asistencia de aparcamiento y el control de cruceo asistido y adaptable proporciona comodidad, al tiempo que advierte el conductor de colisiones inminentes y el control primordial del vehículo para evitar accidentes mejora la seguridad.



Figura 14. Configuración de los radares. Fte. Manual de Usuario BMW Serie 5.

Tipos de radar:

- De corto alcance: Contando con un campo de visión de 60 a 80 grados según modelo, y elevación de hasta 10 grados. Así mismo cuentan un rango de distancias reducido desde 30 cm hasta 10 o 30 metros según el modelo de los mismos. Estos de corto alcance suelen ser una alternativa viable para los mencionados anteriormente ultrasonidos.

- De medio alcance: contando con un campo de visión de 30, 40 o 60 grados según los modelos utilizados, y una elevación de hasta 5 grados. Así mismo cuentan con un rango de distancias desde 1 metro hasta los 100 metros según el modelo que se esté utilizando.
- De largo alcance: contando con un campo de visión entre 10 y 20 grados según los modelos utilizados, y una elevación de hasta 5 grados. Así mismo cuentan con un rango de distancias desde 1 metro hasta los 250 metros según el modelo que se esté utilizando.

Estos modelos presentan una problemática debido a su reducido campo de visión ya que suele perder de vista algunos obstáculos una vez los mismos salen de este campo de visión.

- Integrado a los sensores de visión: este tipo de radar viene integrado a las cámaras de visión obteniendo así mayor campo de visión y calidad de imágenes al mismo tiempo, no solo esto sino también funcionar en conjunto a otros sensores para hacer un reconocimiento de obstáculos desde un punto más elevado (espejo retrovisor) del vehículo. (Delphi, 2011)

Cabe destacar que se pueden hacer combinaciones entre los tipos de corto, mediano y largo alcance para obtener mejores resultados en el campo de visión.

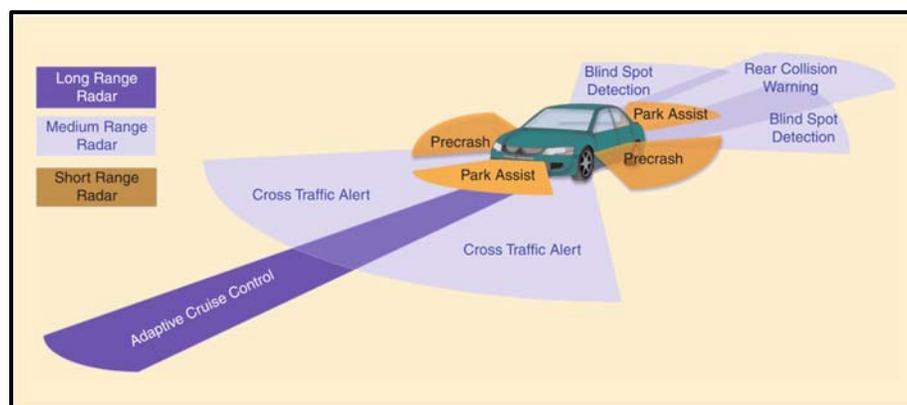


Figura 15. Diferentes rangos del radar y que función realizan. Fte. Automotive Radars: A review of signal processing techniques, Patole et al., 2017

Hay que destacar que cada tipo de radar tiene un uso preferente para el cual el mismo es el más correcto, entre estos usos se pueden mencionar: la detección de peatones, ciclistas, animales y objetos móviles, lo anterior sería mejor el uso de un radar de medio alcance, debido a que el mismo tiene un campo de visión y rango amplio para desarrollar esta función. Sin embargo, para la detección de vehículos y elementos en la vía es preferente usar radares de largo alcance, debido a que los mismos cubren perfectamente distancias más largas sacrificando un poco el campo de visión. La detección de objetos cercanos o de baja altura, obstáculos en el Angulo muerto del vehículo, y vehículos que se acercan a gran velocidad ya viene siendo preferente el uso de combinaciones entre el radar de mediano alcance y el de corto alcance.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> Alta precisión en la determinación de distancias y velocidades relativas que las cámaras. Alta capacidad de detección de objetos y procesamiento de los mismos. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto costo. En radares de baja frecuencia (≤ 30 Ghz) No se pueden usar anchos de banda lo suficientemente amplios y no ofrecen tan buena resolución. <ul style="list-style-type: none"> En radares de alta frecuencia (≥ 30 Ghz), suelen afectar algunas condiciones meteorológicas. No diferencia colores y texturas. Debe usarse combinaciones entre los diferentes tipos de radares para una mejor precisión.

Figura 16. Ventajas y desventajas del uso del radar en los ADAS. Fte. Basado en Balal, Pinhasi, & Pinhasi, 2016; Volvo, 2017

• LIDAR

Los sensores LIDAR pueden proporcionar alta precisión y rango de resolución de datos con un amplio campo de visión. Además, sus capacidades en condiciones adversas han mejorado. Los métodos de detección de obstáculos que usan los sensores lidar se pueden clasificar principalmente en dos tipos para describir el entorno: basado en las características y en enfoques basados en la cuadrícula. (Bengler et al., 2014; Valero Jorge, 2016)



Figura 17. Modelos de LIDAR utilizados. Fte. Velodyne, NXP semiconductors

Los métodos representan datos brutos en características geométricas predefinidas como líneas, cuadros y círculos. Por lo tanto, los obstáculos que se generan a partir de las características se pueden expresar usando solo unos pocos estados, por ejemplo, la posición y orientación del elemento. (Du & Tan, 2016; Han, Kim, Lee, & Sunwoo, 2012)

Para detectar los límites de la carretera usando sensores lidar, hay dos categorías determinadas: 1) Los que están ubicados hacia adelante y 2) y los que están mirando hacia abajo. El escaneo tanto de frente como hacia abajo está estrechamente relacionado debido a que en gran cantidad de los casos los lidar no son capaces de detectar elementos de bordillos, sin embargo, tienen la capacidad de medir barandillas, publicidad y elementos a mediana altura. Las medidas del sensor se utilizan para construir un mapa de cuadrícula de ocupación de espacios, y luego, los límites de la carretera son estimados utilizando el mapa de la cuadrícula y los modelos de carreteras, incluidos modelos parabólicos, clotoides, y circulares. (Hervieu & Soheilian, 2013; Naranjo-Hernandez, José E., Jimenez-Alonso, Felipe, Clavijo-Jimenez, Miguel, Gomez-Casado, 2016)

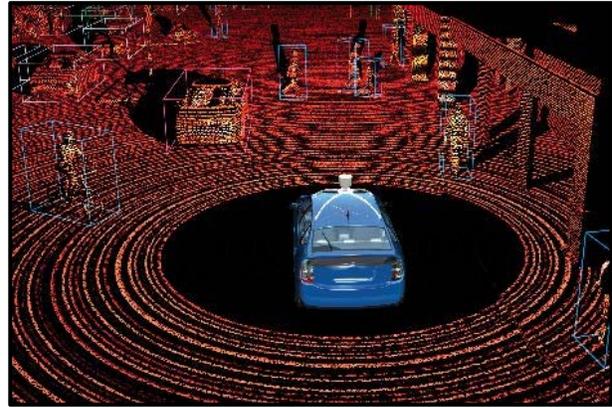


Figura 18. Detección con 3D LIDAR de los objetos que conforman el entorno. Fte. Pendleton et al., 2017

Los sensores lidar que miran hacia abajo se han usado para observar marcas de carriles y obstáculos en el camino, para la detección del límite de la vía. Para reconocer las marcas de la vía, se consideró la reflectividad diferencial entre las marcas de la vía y la superficie de la misma. Sin embargo, aquellas marcas poco visibles o las marcas de carriles faltantes no pueden ser detectadas.

El uso preferente del lidar es el mapeo en 3D del entorno por el cual circula el vehículo en tiempo real, en el cual detecta todo obstáculo móviles o fijos, vehículos, baches, territorio accidentado en ocasiones. Usos más avanzados y con propósitos más específicos requieren tecnologías lidar 360° las cuales suelen ser la base para detectar e integrar más variables al procesamiento de información. Estos sensores laser poseen un rango de distancias que pasa los 100 metros según los diferentes modelos utilizados. (Naranjo-Hernandez, José E., Jimenez-Alonso, Felipe, Clavijo-Jimenez, Miguel, Gomez-Casado, 2016)

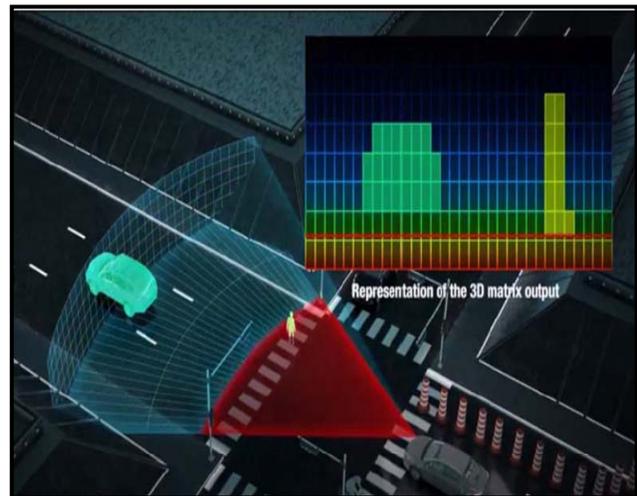


Figura 19. Representación del mapeo 3D de un LIDAR. Fte. LeddarTech

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Mayor velocidad en el procesamiento de información que otros sistemas. • Alta precisión al momento de determinar distancias, velocidades relativas, y otras variables relacionadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo. • Por si solo no detecta colores, tendría que combinarse con algún otro sistema de procesamiento de imágenes. • Debido al método de escaneo (laser), bajo condiciones meteorológicas como lluvia, nieve, niebla o polvo tiende a perder los datos.

Figura 20. Ventajas y desventajas del uso de los LIDAR en los ADAS.

• **Sistemas de posicionamiento Global (GPS) y local.**

¿Cómo funcionan los GPS?

Los satélites GPS dan la vuelta a la Tierra en órbitas bien definidas y transmiten información de satélites y señales a la tierra. Los receptores GPS toman esta información y usan un proceso de "trilateración" para calcular la ubicación del usuario. Esencialmente, el receptor de GPS compara el tiempo con el que se transmitió la señal con el tiempo que se recibió. (Ashley, 2016; BOUDETTE NEAL E., 2017; Cunningham, 2016)

La diferencia de tiempo, o "tiempo de vuelo", le dice al receptor GPS qué tan lejos está el satélite. Con mediciones de distancia de al menos cuatro satélites, tres para posición y una para estimar cualquier desplazamiento en el reloj del receptor; el receptor puede triangular la posición del usuario.



Figura 21. Alguno de los sensores de localización utilizados. Fte. NXP Semiconductors

Tipos de sistemas de posicionamiento global:

- Sistema de navegación inercial: compuesto por sensores de giroscopios y acelerómetros, capaces de calcular la orientación, velocidad, aceleración, trayectorias diferenciales entre otras variables.
- GPS local / diferencial: compuestos por señales de satélites combinándolas con emisores locales georreferenciados (antenas de wifi, antenas de radio, etc.)
- Antena y GPS: sistema que funciona en base a los datos recibidos de los satélites.

- Sistema de posicionamiento nodal mediante otros sensores (cámaras, lidar, etc.): funciona con sistemas locales de posicionamiento apoyándose en sensores de cámaras, lidar, y otros sensores capaces de acceder a información de mapeado de datos.

La función principal de los sistemas de posicionamiento global es la de posicionar el vehículo en el espacio, así mismo recolectar datos de las diferentes variables (velocidad, aceleración, inclinación, trayectoria, etc.) y georreferenciar los demás equipos del sistema. (Ashley, 2016)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Posiciona el vehículo, por consiguiente, sirve para referenciar los demás sistemas integrantes del vehículo. • Utilizando sistemas combinados aportan información de alta precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para lograr alta precisión se necesita combinar sensores lo que no hace que esto sea Económico. • Dependiendo el sistema utilizado puede ser sensible a pérdidas de señal por la orografía, túneles y otras obras.

Figura 22. Ventajas y desventajas del uso de los sistemas de posicionamiento global y local en los ADAS.

- **Sistemas de comunicación e información interna.**

Con el pasar de los años los fabricantes han tenido que ir incluyendo en sus vehículos sistemas de comunicación capaces de informar al conductor de fallos de alguna pieza, falta de aire en las llantas, cambio de aceite, uso del cinturón, etc. Estos sistemas hoy en día cuentan con computadoras capaces de procesar más información y dar datos de los vehículos más precisos en tiempo real.

La función principal de estos sistemas de comunicación es mantener informado al usuario de todo lo referente al vehículo para así facilitar su uso y mantenimiento.

Análisis y decisión: Entendimiento de las variables.

Recibiendo los datos de los sensores y otros sistemas de información se procesa la información mediante un software de inteligencia artificial (IA), el mismo de encarga de dotar de contenido semántico a la escena vial, identificando así las posibles trayectorias conflictivas con otros móviles o cualquier otro peligro presentado y así planear trayectorias que permitan al vehículo reducir los conflictos o peligros evitando o atenuando accidentes. ("Cameras and Sensors for Embedded Vision," 2017; El Natour, Ait-Aider, Rouveure, Berry, & Faure, 2015; Embedded Vision Alliance, 2017)

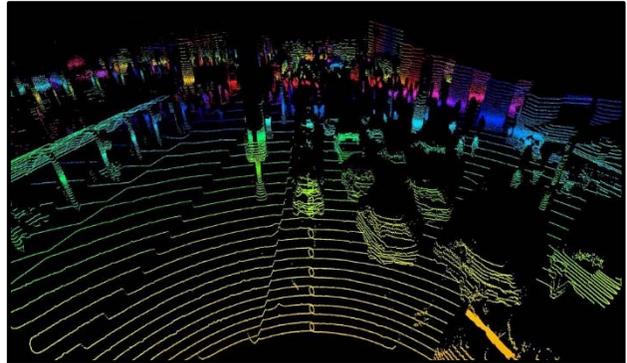


Figura 23. Procesamiento del entorno de los diferentes sensores.
Fte. LeddarTech

Uno de los retos en el procesamiento de información es el combinar los diferentes sensores para que se procese la información de todos a la vez y mediante una relación de todos se obtengan mejores proyecciones de respuesta a cada situación presentada. (Labaziewicz, 2016; Patole et al., 2017; Pendleton et al., 2017)

En la actualidad los sensores existentes hacen que el procesamiento de información sea un poco más ligero para el computador principal, esto se debe a que vienen integrados con sistemas de procesamiento de información propios y los mismos envían información ya elaborada al sistema principal.

Los distintos sistemas de procesamiento ya sea integrado o principal convierten cada elemento real encontrado en la vía en entes matemáticos que guarden relación entre ellos y el vehículo a través del tiempo y el espacio, mediante una serie de algoritmos, que dan como resultados respuestas igual o parecidas a las que tendría un conductor. (T. Wang, Zheng, Xin, & Ma, 2011)

El computador central de procesamiento de información es el encargado de las siguientes funciones:

- Planificar el camino a recorrer y el movimiento del vehículo.
- Adaptarse a las diferentes variables que puedan aparecer en la vía.
- La toma del control de los sistemas del vehículo (frenado, aceleración, direccionamiento, etc.)
- Dar información del entorno, alertas del vehículo, y en algunos casos alertar a servicios de emergencia.



Figura 24. Entendimiento del entorno y predicción de las posibles rutas de esos objetos. Fte. Waymo

- **Acción: cómo reacciona el vehículo a las variables procesadas.**

Definida ya las trayectorias que minimicen el peligro a su mínima expresión. El sistema selecciona una trayectoria óptima de dicho proceso y la pondrá en práctica actuando así sobre los accionadores del vehículo necesarios para proteger al sistema (freno, acelerador, dirección, etc.). Ante la duda de cualquier variable el mismo sistema permite que el usuario tome el control del vehículo. (Labaziewics, 2016)



Figura 25. Conductora Permitiendo que el sistema conduzca por ella. Fte. Motorpasión

En la actualidad se ha optado por el uso de los sistemas de inteligencia artificial programados mediante algo llamado aprendizaje profundo con redes neuronales. Es decir, el mismo tiene un funcionamiento similar al del cerebro humano, se entrena mediante recopilaciones de datos previas, se le enseña al programa todas las posibles reacciones que debe tener, y una vez comprobado que todo esto funciona de manera correcta, se graba en el microprocesador y se instala en la placa madre del sistema.

Compañías como BMW, Tesla, Volkswagen, Daimler Mercedes-Benz y Audi, han optado por esta tecnología de aprendizaje profundo en Estados Unidos y Europa, basándose en la recopilación de información mediante los sistemas de escaneo que las diferentes empresas de transporte terrestre han acordado instalar en sus vehículos, también contando cada empresa con su propia flota de vehículos que se encargan de hacer recorridos programados a diario para recopilar información del área.



Figura 26. Acción de vehículo autónomo visto desde el mapa digital. Fte. Waymo

Entre los comentarios de algunos fabricantes acerca de contar con bases de datos actualizadas y completas cabe destacar algunos:

"Pero si el mapa sabe que hay una señal de stop por delante, entonces los sensores solo necesitan para confirmarlo", dijo Puttagunta. "Entonces la carga en los sensores y el procesador es mucho menor". Hablando con relación a La razón por la cual los mapas digitales son tan importantes es que incluso los más avanzados los sensores, como el radar y las cámaras, no son suficientes para permitir que un automóvil navegue en un mundo caótico y cambiante con la seguridad suficiente como para permitir que los ocupantes se reclinen y tomen una siesta.



Figura 27. Acción de vehículo autónomo visto desde el mapa digital. Fte. Waymo

"Para una autonomía total, creemos que necesitamos tener un mapa de alta definición del área en la que hemos estado trabajando, un mapa anotado con lo que son los objetos fijos permanentes en esa área", dijo Raj Nair, jefe de desarrollo de productos en Ford. El mismo considera que con el avance de las tecnologías para el 2021 existan vehículos de total autonomía sin volante y sin pedales. (BOUDETTE NEAL E., 2017)

2.2.2. Capacidad actual de los sistemas autónomos de conducción

Hoy en día los sistemas de conducción autónoma existentes tienen la capacidad de controlar el vehículo en momentos, delegando el control del vehículo al conductor ante la duda. En la actualidad se cuenta con un sistema que puede variar según su fabricante, pero la finalidad es la misma, proporcionar ciertos niveles de autonomía a los vehículos. (Tesla, 2016; Tomás Martínez, Moreno García-Cano, Arriola Ballesteros, & Blanco Bergareche, 2017)

Estos niveles de autonomía se han definido por algunas entidades del transporte como lo son la SAE International (Society of Automotive Engineers), BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen / Federal Highway Research Institute), OICA (Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles) y la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration). Estas instituciones

han establecido los niveles de automatización y aunque alguno de estos sea diferente de otro en un nivel en su esencia es igual.

SAE level	Name	Narrative Definition	Execution of Steering and Acceleration/Deceleration	Monitoring of Driving Environment	Fallback Performance of Dynamic Driving Task	System Capability (Driving Modes)
Human driver monitors the driving environment						
0	No Automation	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a
1	Driver Assistance	the <i>driving mode</i> -specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes
2	Partial Automation	the <i>driving mode</i> -specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	System	Human driver	Human driver	Some driving modes
Automated driving system ("system") monitors the driving environment						
3	Conditional Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the dynamic driving task with the expectation that the <i>human driver</i> will respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	Human driver	Some driving modes
4	High Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an automated driving system of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even if a <i>human driver</i> does not respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	System	Some driving modes
5	Full Automation	the full-time performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>	System	System	System	All driving modes

Figura 28. Niveles de automatización establecidos por la SAE J3016. Fte. SAE International

En la figura 25 se presentan los 6 niveles de automatización establecidos por la SAE. Los niveles de automatización de conducción de SAE son descriptivos e informativos, más que normativos, y más técnicos que legales. Los elementos indican capacidades mínimas en lugar de máximas para cada nivel.

En la J3016, SAE International, 2014 se describió la función que desempeña tanto el conductor como el vehículo en cada nivel de automatización, a continuación se presentara un cuadro que refleja las funciones realizadas por cada uno.

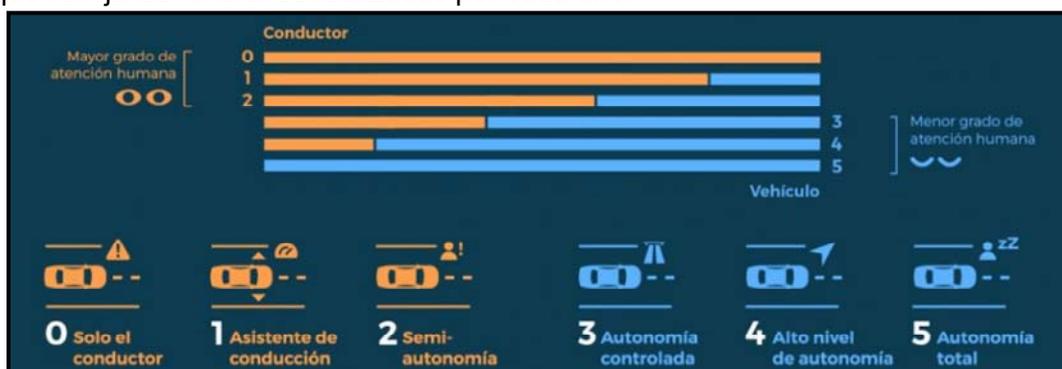


Figura 29. Niveles de automatización según el grado de atención del conductor. Fte. CAR Magazine

Niveles de Automatización	Papel del usuario	Rol del sistema de automatización de conducción
Tareas dinámicas de conducción: El usuario las realiza.		
<p>Nivel 0: sin automatización</p> 	<ul style="list-style-type: none"> El conductor: en todo momento realiza las maniobras del vehículo. 	<p>Sistema de automatización de conducción (si lo hay):</p> <ul style="list-style-type: none"> No realiza ninguna acción sobre el vehículo, sin embargo puede proporcionar advertencias o apoyo como intervención de emergencia momentánea.
<p>Nivel 1: Asistencia conductor</p> 	<p>Conductor (en todo momento):</p> <ul style="list-style-type: none"> Realiza el resto de las operaciones dinámicas no realizado por el sistema de automatización de conducción. Supervisa el sistema de automatización de conducción e interviene según sea necesario para mantener el funcionamiento seguro del vehículo. Determina cuando el compromiso o la desconexión del sistema de automatización de conducción es apropiado, y actúa o no sobre esto. Ejecuta inmediatamente toda maniobra de conducción cuando sea necesario o deseado. 	<p>Sistema de automatización de conducción (mientras está encendido):</p> <ul style="list-style-type: none"> Realiza parte de las maniobras del vehículo ejecutando la subtarea de control de movimiento longitudinal o lateral del vehículo. Se desconecta inmediatamente después de la solicitud del conductor
<p>Nivel 2: Automatización parcial de conducción</p> 	<p>Conductor (en todo momento):</p> <ul style="list-style-type: none"> Realiza el resto de maniobras no realizadas por el sistema de automatización de conducción. Supervisa el sistema de automatización de conducción e interviene según sea necesario para mantener el funcionamiento seguro del vehículo. Determina cuando el compromiso y la desconexión del 	<p>Sistema de automatización de conducción (mientras está encendido):</p> <ul style="list-style-type: none"> Realiza parte de las maniobras ejecutando subtareas de control de movimiento lateral y longitudinal del vehículo. Se desconecta inmediatamente después de la solicitud del conductor.

	<p>sistema de automatización de conducción es apropiado, y actúa sobre la misma o no.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ejecuta inmediatamente toda maniobra cuando sea necesario o deseado por el mismo. 	
Tareas dinámicas de la conducción: el sistema de conducción automatizado las realiza.		
<p>Nivel 3: Automatización condicional de la conducción</p> 	<p>Conductor (mientras el ADS no está activado):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verifica la disponibilidad operacional del vehículo equipado con ADS. • Determina cuándo es apropiado el compromiso de ADS. • Se convierte en el usuario preparado para el respaldo del sistema cuando este se encuentra activado. <p>Sistemas de maniobras listos para el usuario (mientras el ADS está activado):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es receptivo a una solicitud para intervenir y responde al realizar una devolución de control del vehículo de manera oportuna. • Es receptivo a las fallas del sistema relevantes para el rendimiento del control en los sistemas del vehículo y, en caso de que ocurra, realiza el retorno del control de maniobras de manera oportuna. • Determina si es y cómo lograr una condición de riesgo mínimo. • Se convierte en el conductor al solicitar la desconexión de los ADS. 	<p>ADS (mientras no está Activado):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permite intervenir solo dentro de su dominio operacional de diseño. <p>ADS (mientras está Encendido):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realiza toda maniobra dinámica del vehículo. • Determina si los límites de dominio operacional de diseño están a punto de ser excedidos y, en caso afirmativo, emite una solicitud oportuna para intervención del usuario y que este tome el control. • Determina si hay un fallo del sistema ADS relevante para el rendimiento del sistema de control y, de ser así, emite una solicitud oportuna para intervención del usuario y que este tome el control. • Se desconecta un tiempo apropiado después de emitir una solicitud para intervenir. • Se desconecta inmediatamente después de la solicitud del conductor.
<p>Nivel 4: Alta automatización de la conducción</p>	<p>Conductor / (mientras que el ADS no está activado):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verifica la disponibilidad operacional del vehículo equipado con ADS. 	<p>ADS (mientras no esté activado):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permite el compromiso solo dentro de su dominio operacional de diseño.

	<ul style="list-style-type: none"> • Determina si involucrar a los ADS. • Se convierte en pasajero cuando el ADS está activado solo si está físicamente presente en el vehículo. <p>Pasajero (mientras el ADS está Activado):</p> <ul style="list-style-type: none"> • No es necesario realizar la toma del control de maniobras. • No es necesario determinar cómo lograr una condición de riesgo mínima. • Puede luego de una solicitud para intervenir. • Puede solicitar que los ADS se desactiven y pueda lograr una condición de riesgo mínima después de que se desactive. • Puede convertirse en el conductor después de una desconexión solicitada. 	<p>ADS (mientras está activado):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realiza todas las maniobras de control. • Puede emitir una solicitud oportuna para intervenir. <p>Realiza el repliegue y las transiciones de control automáticamente a una condición de riesgo mínimo cuando:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un usuario solicita que logre una condición de riesgo mínima. <p>Se desvincula, si es apropiado, solo después de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alcanzar una condición de riesgo mínimo o Un conductor este realizando el control de maniobras. • Puede retrasar la desconexión solicitada por el usuario ADS
<p>Nivel 5: Automatización total de la conducción</p> 	<p>Conductor (mientras que el ADS no está activado):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verifica la disponibilidad operacional del vehículo equipado con ADS • Determina si involucrar a los ADS • Se convierte en pasajero cuando el ADS está activado solo si está físicamente presente en el vehículo <p>Pasajero (mientras el ADS está encendido):</p> <ul style="list-style-type: none"> • No es necesario realizar la toma del control. • No es necesario determinar cómo lograr una condición de riesgo mínima 	<p>ADS (mientras no esté activado):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permite la participación de los ADS en todas las condiciones de conducción manejables por el conductor. <p>ADS (mientras está activado):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realiza todo el control de maniobras. <p>Realiza el repliegue y las transiciones de control automáticamente a una condición de riesgo mínimo cuando:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se produce un fallo del sistema relevante para el rendimiento del sistema. • Un usuario no responde a una solicitud para intervenir.

	<ul style="list-style-type: none"> • Puede realizar la toma de control luego de una solicitud para intervenir. • Puede solicitar que los ADS se desactiven y pueda lograr una condición de riesgo mínima después de que se desactive. • Puede convertirse en el conductor después de una desconexión solicitada 	<ul style="list-style-type: none"> • Un usuario solicita que logre una condición de riesgo mínima. <p>Se desvincula, si es apropiado, solo después de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alcanza una condición de riesgo mínimo. • Un conductor está realizando las maniobras de control. • El sistema puede retrasar una desconexión solicitada por el usuario.
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Figura 30. Rol del usuario y del Sistema de conducción autónoma según los niveles de automatización. Fte. Adaptación basada en tabla del SAE J3016.

La administración de seguridad del tránsito Nacional en autopistas de Estados Unidos (NHTSA) en el Artículo “Explotación de la red vial & Sistemas inteligentes de transporte” (Shuman, 2016), realiza una puntuación de 5 niveles de automatización de 0 a 4, a diferencia de la SAE que cuenta con 6 niveles de automatización. El nivel 4 de la NHTSA engloba la conducción completamente automatizada denominándola “Auto conducción con automática”.

Los vehículos que actualmente encontramos en el mercado alcanzan a tener el nivel 2, e, incluso, el nivel 3 en ciertos dominios operacionales controlados, como autopistas y autovías con buena geometría. (Motorpasion Branded-Collaborators, 2017)

En el artículo “Transition of control in a partially automated vehicle: Effects of anticipation and non-driving-related task involvement” (Dogan et al., 2017), indican que actualmente estamos en un nivel de conducción 2 en el que al menos dos de las funciones de control primarias son automáticas (como pueden ser frenado, aceleración, etc.). La tarea del conductor en estos vehículos es monitorear el mismo y tomar el control de manera inmediata en caso de haber una alerta de desconexión del sistema.

Según “Definition of necessary vehicle and infrastructure systems for Automated Driving” (Krosse et al., 2010) desde un punto de vista técnico, la tecnología actual está lista para la conducción autónoma en carriles separados con un entorno controlado. El reto existente está en el uso de vehículos altamente automatizados con un conductor en entorno de tráfico mixto.

El Conductor más que nada juega un papel de supervisor, y su función principal es asegurar que la transición del control se haga de manera segura y exitosa. Krosse et al., 2010, se plantean si podría mejorar el conocimiento de la situación del conductor a través de la provisión de información del sistema automatizado, y del entorno de manejo, lo que ayudaría al conductor a anticipar una cesión del control.

Es muy probable que la automatización reduzca la conciencia de la situación del conductor a medida que va cambiando también la naturaleza de la tarea realizada, que va desde conductor manual activo a supervisor para lo cual actualmente aun el conductor no está preparado mentalmente, según Jack Weast (director del equipo de ingenieros y responsable de la arquitectura del sistema en el Autonomous Driving Group de Intel), la gente le tiene miedo a los coches autónomos o robotizados, al menos hasta que lo prueban. Estas conclusiones las tomaron a partir de su estudio “intel Trust Interaction Study” en el que analizaron la interacción

entre las personas y los coches autónomos, y las preocupaciones que presentaban estas personas ante esta tecnología.

La autonomía proporcionada se hace mediante la opción de asistentes de control, entre los cuales se pueden destacar:

- **Control de crucero:**

El mismo encargado de controlar la potencia del motor, permitiendo mantener una velocidad constante sin la necesidad del uso del pedal del acelerador.

Este control de velocidad existe ya desde los años 2000 que fue implementado en algunos vehículos para ayudar que el conductor no se desgastara tanto en los viajes largos.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • En trayectos largos con poco tráfico, el desgaste del conductor es menor. • Al controlar la velocidad es utilizado por los conductores para no violar los límites de velocidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Al no tener la necesidad de poner el pie en el pedal puede desviar la atención del conductor y ocasionar un accidente. • Este control por sí solo no cuenta con la capacidad suficiente para operar de manera segura bajo condiciones climatológicas desfavorables.

Figura 31. Ventajas y desventajas del control de crucero.

- **Control de crucero Adaptativo**

Se Basa en los sistemas tradicionales de control de velocidad mediante la adición de sensores que hacen un seguimiento de la distancia al vehículo que le precede. Los conductores pueden establecer la distancia a la cual quieren ir del otro vehículo, y el sistema siguiendo estas indicaciones va a acelerar o frenar automáticamente para mantener la distancia establecida. En caso de una parada repentina brusca o en casos de emergencia, el sistema alerta al conductor para que el mismo tome acción sobre esto. (Delphi, 1999; Gibson, 2017; Shuman, 2016; Tesla, 2016; Volvo, 2017)



Figura 32. Indicaciones en pantalla de cuando el sistema está activado. Fte. Hyundai

Para su funcionamiento suele ser necesario que el vehículo este en marcha y necesita ser activado manualmente, Iniciado manualmente se programa la velocidad objetivo y en algunos casos la distancia de seguridad con el vehículo próximo.(Gibson, 2017; J. Wang, Xu, Liu, Sun, & Chen, 2014)



Figura 33. Indicación en tablero de control adaptativo de cruceo activado. Fte. Mercedes-Benz

El sistema de control de cruceo adaptativo según el fabricante puede venir con diferentes módulos integrados que ayudan al sistema a percibir y actuar de una manera u otra. Entre estos módulos se encuentra:

- Módulo ACC: Este funciona a través de un radar, el cual determina si hay algún vehículo dentro de la distancia prefijada según la velocidad de circulación, enviando esta información al controlador de motor y frenos para que los mismos se encarguen de mantener la distancia y la velocidad de conducción segura.
 - Módulo de control de motor: este se encarga de procesar la información recibida del ACC, y accionar controlando la velocidad del vehículo en función de la información obtenida.
 - Módulo de control de frenos: El mismo determina la velocidad del vehículo a través de los sensores de las ruedas y así lo desacelera mediante la aplicación de los frenos cuando así lo requiera el módulo ACC.

El control de cruceo adaptativo suele instalarse en conjunto al asistente de colisiones frontales, que aporta un grado más seguridad en el momento de acción/reacción del usuario en casos de emergencia, este asistente puede reaccionar en casos que el usuario aún no se ha dado cuenta que puede haber una amenaza. Aun así, el sistema aun no es fiable del todo, ya que los fabricantes advierten que el mismo sistema no es capaz de gestionar todas las situaciones que se puedan presentar.

En casos de emergencia el mismo Sistema no suele hacer un frenado brusco, sino que avisa al conductor, inicia una desaceleración hasta el 40% de la capacidad de frenado, avisa nuevamente al conductor y para finalizar cede el control total del vehículo al conductor. No se recomienda su uso en entornos urbanos, más que nada por la cantidad de paradas en tramos cortos de vía, y también debido a que el mismo no funciona en velocidades bajas (menores de 25 km/h).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Reduce el consumo de combustible, evitando picos de velocidades. • Ajusta la velocidad según el tráfico. • En trayectos largos (carreteras y autopistas) reduce el agotamiento de los conductores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los sensores se ven afectados por condiciones climáticas adversas. • La distancia entre vehículos normalmente suele ser grande, pudiendo provocar esto que otros vehículos entren delante. • Puede provocar que los conductores se acomoden y pierdan la concentración en la vía. • En bajas velocidades (20-30 km/h el conductor debe tomar el control del vehículo debido a que el sistema no funciona a bajas velocidades.

Figura 34. Ventajas y desventajas del control de crucero adaptativo.

• **Asistente de frenado Activo.**

Este asistente describe una serie de sistemas que ayudan al vehículo a detenerse rápidamente en casos de emergencia. El procedimiento de actuación como otros asistentes en primera instancia alerta al conductor mediante graficas en el tablero, y sonidos en el equipo de sonido interno, luego pasa a bloquear los cinturones de seguridad y preparar otras medidas anti-colisión, en caso que el conductor no responda a estos avisos previos el sistema toma el control del frenado e inicia el mismo de manera inmediata. (Delphi, 2009a; Jang, Kim, Jo, & Sunwoo, 2017; Polychronopoulos, Scheunert, & Tango, 2004; Shuman, 2016)



Figura 35. proyección del rango de los radares del asistente de frenado activo. Fte. Mercedes-Benz

Algunos sistemas utilizan sensores de radar e imagen para poder detectar peligros potenciales y activar o no los sistemas de frenos. Otros sistemas aplican el sistema de frenos automáticamente sin ninguna intervención del conductor, esto solo si los sensores del vehículo detectan un peligro inminente y la necesidad de una parada de emergencia.

En algunos casos la posible maniobra evasiva de la colisión se ve graficada en el tablero o pantalla central para informar al conductor de la posibilidad en caso de que el mismo no tengo tiempo suficiente de reacción.

- **Asistente de aparcamiento.**

Usando radares, sensores de proximidad, y otros sensores el mismo se encarga de en algunos casos avisar al conductor proximidad y/o correcto aparcado, aunque en la actualidad se cuenta con sistemas de control de aparcamiento que controlan todo el vehículo e incluso hacen la maniobra de aparcamiento de manera automática.(Delphi, 2017; Shuman, 2016; Tesla, 2016; Volvo, 2017)



Figura 36. a) Visión de la cámara de control de parqueo. b) Maniobra de aparcamiento de sistema autónomo. Fte. Delphi

- **Asistente de dirección**

Apoyándose en la visualización de las marcas viales mediante sensores gráficos, este asistente se encarga de mantener al vehículo dentro de su carril, en conjunto con el radar y el ultrasonido para alertar al vehículo de posibles colisiones dentro de su área segura de conducción.(Eidehall, 2004; Kazama, Nishizaki, Shirayuma, Furusho, & Mouri, 2017; Tesla, 2016)

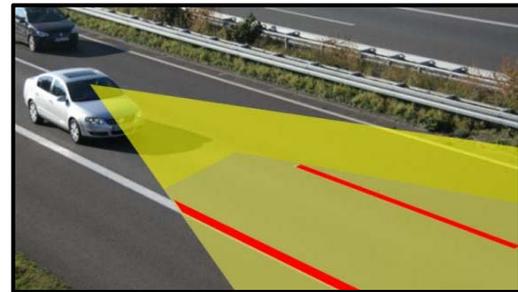


Figura 37. Guiado del vehículo por marcas viales. Fte. International Organization of motor vehicle Manufacturers (OICA)

Las condiciones ideales de funcionamiento es que las marcas viales sean uniformes, y se distingan claramente en el pavimento. También suele funcionar en conjunto con el control de crucero adaptativo para un funcionamiento más preciso.(T. Wang et al., 2011)



Figura 38. Marcas viales en deterioro. Fte. Toma Propia.

En casos como el anterior que trabajan en conjunto ambas funciones el sistema suele tomar de referencia de guiado al vehículo precedente de haber alguno, en caso contrario toma como referencia de guiado las marcas viales, en casos de no tener claro un vehículo delante o marcas viales el sistema alerta al conductor y cede el control total.

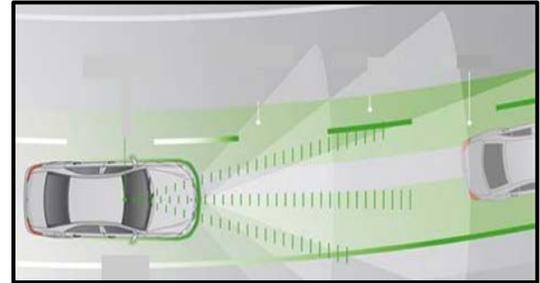


Figura 39. Funcionamiento de los sensores combinados para la obtención de un mejor guiado. Fte. International Organization of motor vehicle Manufacturers (OICA)

Hacer mención que los fabricantes advierten que estos sistemas aun no son completamente fiables, ya que los mismos aun no logran tener respuesta a todas las situaciones posibles que se pueden presentar en la vía.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Ayudan al conductor a no salirse del carril de manera involuntaria. • Obliga al conductor al uso de las direccionales para salir del carril. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede provocar sensación de comodidad al conductor y el mismo perder la atención de la vía y de colisiones laterales. • Se ve afectado por condiciones climatológicas adversas. • Se ve afectado por el mal estado de las marcas viales, es decir sin marcas viales en condiciones el mismo sistema no funciona de manera segura.

Figura 40. Ventajas y desventajas del asistente de dirección.

• **Asistente de adelantamiento.**

Al igual que otros asistentes este se apoya en el control de crucero adaptativo, y el asistente de dirección para adelantar al vehículo precedente, esto lo hace posible la activación manual de la intermitente de la dirección en la que se desea adelantar. Este cambio de carril solo es posible cuando el sistema no detecta ningún vehículo y/o obstáculo en el carril de cambio que imposibiliten este movimiento. (Eidehall, 2004)



Figura 41. Maniobra realizada por el asistente de adelantamiento. Fte. AutoBild

El rendimiento actual de los sensores necesarios es suficiente para permitir diversas aplicaciones de manejo automático que se encuentran actualmente en el mercado. Sin embargo, los sensores existentes están abiertos para mejoras, y como todo sistema en un futuro con el avance y las exigencias de los sistemas autónomos los mismos exigirán una mayor complejidad, y también sensores mejorados.

Curva de aprendizaje del sistema de conducción autónomo

En un artículo de Bloomberg “self-driving cars need to slow down after uber crash” David Fickling, 2018, se hace mención de la curva de aprendizaje por la cual los vehículos autónomos han estado pasando para recopilar información para una infraestructura digital eficiente, en el mismo artículo se presenta una tabla con las desconexiones producidas en cierta cantidad de millas recorridas con vehículos autónomos, estos datos registrados por el Departamento de vehículos motorizados de california en su reporte “autonomous vehicle disengagement reports 2017”.

	Miles driven	Disengagements	Miles per disengagement
Waymo	352,545	63	5,595.95
GM Cruise	131,676	105	1,254.06
Nissan	5,007	24	208.63
Zoox	2,244	14	160.29
Drive.ai	6,015	92	65.38
Baidu	1,949	43	45.33
Telenav	1,581	52	30.40
Aptiv	1,811	81	22.35
Nvidia	505	109	4.63
Valeo	552	212	2.61
Bosch	2,041	1,196	1.71
Mercedes-Benz	1,088	843	1.29

Figura 42. Desconexiones del sistema de conducción por millas recorridas. Fte. Basado en los reportes de desconexión del estado de california.

En la tabla anterior se muestran las desconexiones y según los diferentes reportes de desconexión, las mismas fueron provocadas en general por:

- Discrepancia en la planificación de que hacer en determinado momento.
- Discrepancias en la percepción del entorno.
- Discrepancias en el hardware.
- Imprudencias producidas por los usuarios de la vía (entorno de tráfico mixto).
- Maniobra no deseada del vehículo (errores en la toma de acción del sistema).
- Predicción y acción incorrecta de los otros medios participantes en el tráfico.
- Problemas con el sistema de guiado debido a marcar viales en mal estado.
- Problemas manteniendo la distancia entre vehículos en situaciones de tráfico pesado
- Al momento de aparcar no detección de marca de parqueo, debido a que otro vehículo no estaba correctamente aparcado.
- Rebases de vehículos muy cercanos.
- En entornos urbanos, debido a la presencia activa de peatones.
- En casos en los que ciclo-andantes estaban presentes en el entorno el sistema por seguridad desconectaba.

Cabe destacar que estas millas recorridas fueron solo en el estado de california, así que estas cifras si la llevamos a un plano global pueden aumentar considerablemente.

En otras investigaciones fueron encontradas las mismas razones de desconexión durante pruebas realizadas entre 2014-2015. En esta investigación se observa claramente como el vehículo no reconoce las marcas viales en mal estado, y por lo tanto provoca desconexiones. (Shammas, 2017)

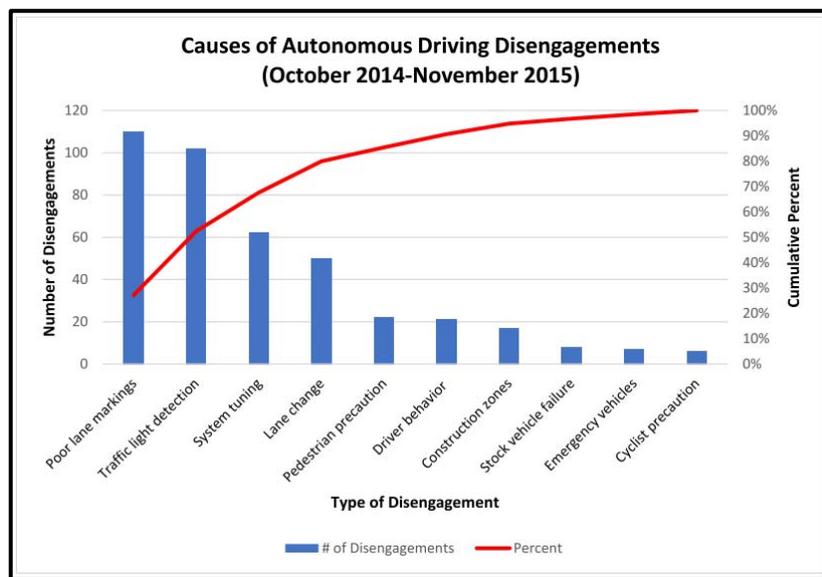


Figura 43. Causas de desconexión del sistema. Fte. Shammas, 2017

Observando las razones de desconexión de los reportes se observa que el sistema tiene aún mucho que superar, pero a la vez queda claro que a largo plazo lo que se planea hacer es eliminar el factor humano de la conducción. Enrique Dans, profesor de sistemas de información

del IE, en un artículo comenta “La única manera de que los vehículos sean totalmente seguros es no dejar actuar el factor humano”, explica que estas tecnologías son capaces de aprender de las situaciones, Los accidentes que ocurren una vez no se repetirán debido a que el algoritmo se actualiza.

Respecto a esta problemática de desconexiones en los sistemas autónomos Naujoks, Wiedemann, Schömig, Jarosch, & Gold, 2018 desarrolla una investigación con la finalidad de establecer un esquema de calificación estandarizado de la capacidad de mantener el control sobre estos sistemas (TOC-Rating, por sus siglas en inglés) en situaciones variadas. Las imprecisiones y los errores de conducción están relacionados a diferentes aspectos de la tarea de conducción. En el TOC-Rating se evaluaron en diferentes categorías todos los aspectos desde los gestos del conductor hasta el control parcial de las funciones del vehículo. Que los usuarios puedan tomar el control de manera segura es de gran importancia para mitigar los problemas que pueda traer estas desconexiones y posterior toma del control manual del vehículo.

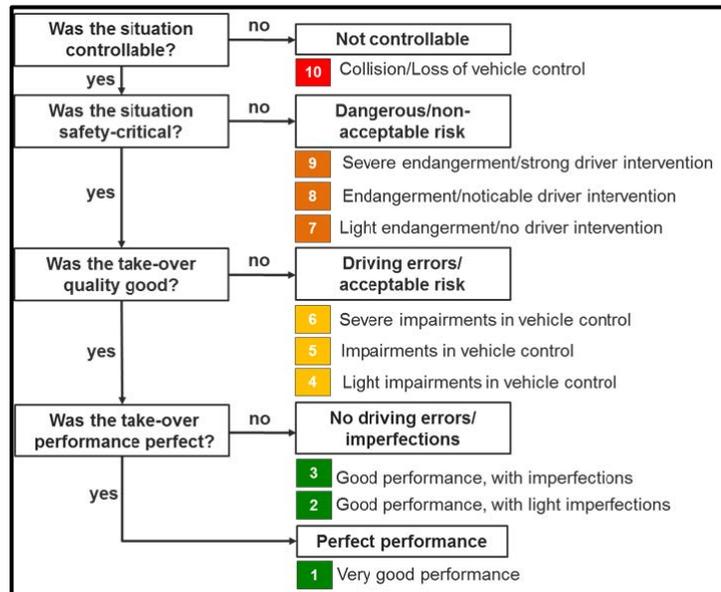


Figura 44. Esquema de calificación estandarizado de la capacidad de mantener el control sobre los sistemas autónomos (TOC-Rating). Fte. Naujoks, Wiedemann, Schömig, Jarosch, & Gold, 2018

Cuando se está hablando de tecnología es más importante que funcione de manera correcta, a ser el primero en desarrollar un sistema. El mayor riesgo de esta tecnología sería un lanzamiento apresurado de tecnologías no aptas y causar accidentes. David Fickling comenta una lección aprendida por la industria automotriz la cual es “muévete rápido y rompe cosas” que está muy bien, a menos que las cosas que terminen rotas sean cuerpos humanos, apuntando a que las tecnologías deben avanzar con precaución, cuidando así la seguridad de los sistemas.

2.2.3. Capacidad esperada de los sistemas autónomos de conducción en el medio y largo plazo

2.2.3.1. Capacidad esperada en el medio plazo

Sergio Gómez Recio en una conferencia de CESVIMAP (Gómez Recio, 2016; Recio, 2016), destacó los beneficios que traería la implementación de estos sistemas, y los costes y barreras a superar. Estos fueron:

Beneficios	Costes - Barreras
<ul style="list-style-type: none"> • Reducción del estrés del conductor. • Incremento de la productividad del conductor. • Disminución de los costes del combustible. • Reducción de la contaminación. • Aumento de la seguridad (eliminaría los fallos humanos provocados por distracciones, alcohol, fatiga, etc.). • Aumento en la capacidad de la carretera (Platooning (Bagloee et al., 2016)). • Estacionamiento más eficiente. • Acceso a movilidad universal (los discapacitados, ancianos, jóvenes). 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento en los costos de los vehículos, así mismo el mantenimiento del vehículo y de la infraestructura. • Nuevos riesgos a superar: fallos del sistema (en entornos de tráfico mixto), o la ciberseguridad. • Preocupaciones por parte de los ocupantes del vehículo acerca de su seguridad y privacidad (quedo demostrado en estudio de Intel que las personas que aún no han probado estos sistemas les temen a sus asistencias de conducción). • Reducción de empleos, los conductores y los talleres que se queden rezagados en la carrera tecnológica. • ¿Necesidad de una nueva licencia de circulación? ¿Caso de accidente quien carga con la culpa humano/maquina?

Figura 45. Beneficios y barreras del sistema de conducción autónoma. Fte. CESVIMAP

El vehículo autónomo aún se encuentra en fase de desarrollo y experimentación, y aunque se cuenta con grandes avances en estos sistemas apenas podríamos decir que contamos con sistemas de coches semiautónomos.

Los fabricantes cada día avanzan en la investigación para hacer el sistema más fiable y con miras a una automatización completa de los vehículos. Hablar de avances en esta tecnología a medio plazo es hablar de los cambios que puedan surgir desde el día de hoy a 5 años, ya muchos fabricantes se han tomado el atrevimiento de alegar que para el año próximo ya habrá coches autónomos, sin embargo, otros profesionales como Felipe Jiménez, profesor del INSIA (Instituto Universitario de Investigación del Automóvil), no está de acuerdo y el mismo comenta que faltaría más tiempo aun, dicha fecha podría ser entorno al 2025. Comenta en el artículo “Los cuatro retos a superar por la segunda generación de coches autónomos antes de triunfar” que para entonces “tendremos coches autónomos conducidos en condiciones bastante controladas en ambientes estructurados, como puede ser una carretera. Habrá que esperar algo más para ver eso mismo en ambiente urbanos”(Motorpasion Branded-Collaborators, 2017)

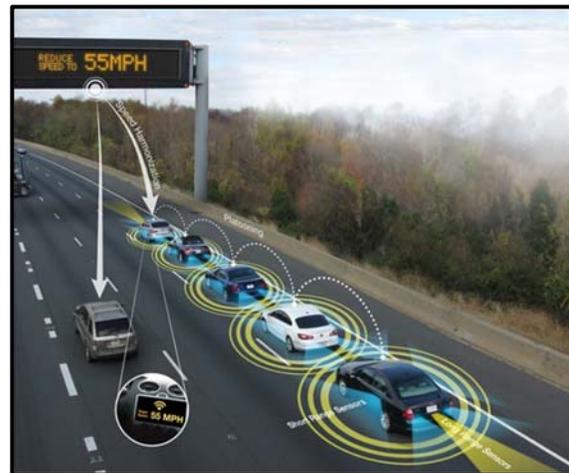


Figura 46. Impacto del platooning en la capacidad de la vía y armonización de las velocidades. Fte. USDOT

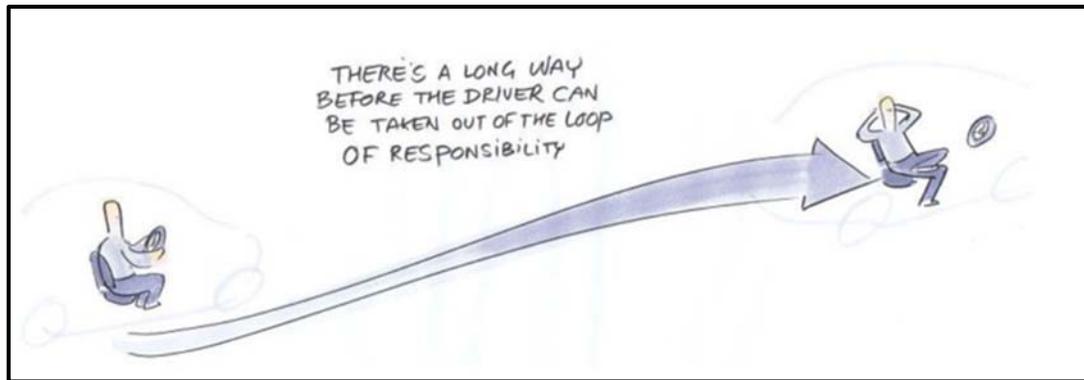


Figura 47. Sustituir al conductor por el sistema requiere de tiempo. Fte. Krosse et al., 2010

Definir mediano plazo a los próximos 5 años y ver cómo puede evolucionar el sistema de conducción autónoma. Algunos fabricantes aseguran que para el 2020 tendrán vehículos altamente equipados, que realmente la barrera más importante en este tiempo es lograr que el usuario pierda el miedo a los sistemas.



Figura 48. Predicciones de que pasara con los sistemas autonomos en los próximos años. Fte. AutoBild

Las viabilidades de estos sistemas han establecido condiciones en la infraestructura tanto digital, como física. La infraestructura digital es más que nada mapas digitales con alta densidad de información y manejo de datos relativos a la vía y su entorno, así como los diferentes eventos dinámicos que ocurren en esta. La infraestructura física siendo esta todos los elementos que componen la vía (señalización, balizamiento, márgenes de la vía, etc.)(Tomás Martínez et al., 2017)

La infraestructura digital para este umbral de 5 años es algo por lo que apuestan muchos fabricantes, debido a que parte importante de que los vehículos autónomos respondan de manera efectiva al entorno vial es que tengan una base de datos fiable y amplia. La infraestructura física, sin embargo, fabricantes comentan que puede que necesiten algunos cambios menores como mejoras marginales, debido a que los sistemas de mapeo y obtención

de la infraestructura digital están recolectando datos de la infraestructura actual lo que haría la misma la más fiable para el funcionamiento. (BOUDETTE NEAL E., 2017; Jiménez et al., 2016)

En “Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies” (Bagloee et al., 2016), hace referencia a otra problemática de estos sistemas deben superar en los próximos años, la misma es la ética de la máquina, se supone que estos sistemas deben erradicar el error humano en situaciones de emergencia y hacer que la carretera sea más segura. Sin embargo, la tasa de fallos aun no podrá ser equivalente a cero, o aun hasta que no haya un entorno completamente autónomo donde el tráfico de vehículos no sea mixto, adicionalmente a esto, el factor humano, los peatones en este caso siempre estarán presentes en cualquier sistema de transporte, por lo tanto, a la hora de pre programar los vehículos autónomos deben incluirse más casos de bloqueo y reacción del sistema.

2.2.3.2. Capacidad esperada a largo plazo

En el artículo “Car of the future V3.0” (Barell et al., 2016), los autores hacen hincapié en que debido al avance que ha tenido la tecnología en los últimos años el vehículo tal como lo conocemos hoy podría desaparecer, para darle paso a la tecnología autónoma antes de lo pensado, y creen que en algún momento entre el 2025 y el 2030 ya existirán vehículos totalmente autónomos, aunque ya algunas marcas aseguran que para el 2021 estos estarán en el mercado.

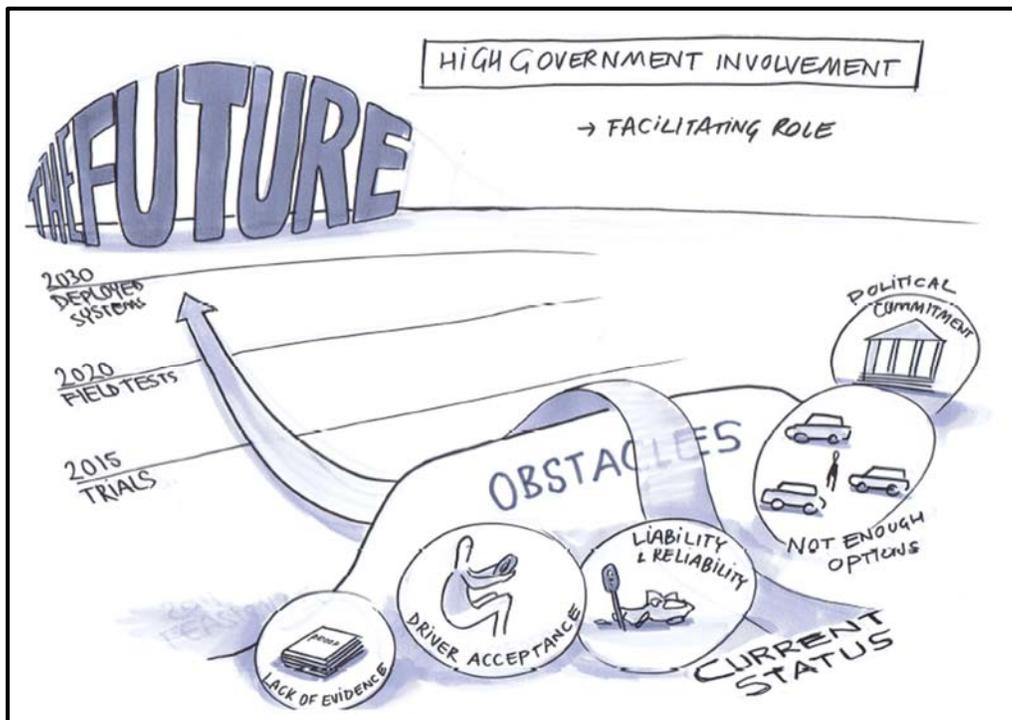


Figura 49. Proyección futura de los sistemas de conducción. Fte. Krosse et al., 2010

Sin embargo, Belén Aranda, directora de ingeniería avanzada de conducción autónoma en BOSCH, en una entrevista comenta que cree que si la tecnología sigue avanzando a este ritmo para finales del 2025 tendremos vehículos nivel 5 circulando, pero en entornos muy controlados, y algo más seguro a esto en 2030. También cree que no solo se deberían invertir recursos en tecnología, sino también, invertir tiempo y dinero en explicar a los conductores que es lo que tienen estos vehículos, como funcionan y en que nos pueden ayudar.

En otras notas de este artículo se puede observar cual podría ser un posible uso para los vehículos autónomos en un futuro, esto sería algo llamado “robotaxis”, que no es más que taxis totalmente automatizados tanto en carreteras como en zonas urbanas funcionando a un alto nivel de seguridad. Estos han estado funcionando de con UBER y Lyft, pero aun con conductores dentro como soporte y en entornos dentro del dominio operacional del vehículo. Bob Lutz, Vicepresidente de GM, y reconocido por su largo camino en el mundo del desarrollo automotriz en una entrevista comenta que el ser humano es individualista por naturaleza, y por lo tanto siempre que pueda optar por un coche propio e individual, haciendo referencia a la pregunta acerca del car sharing y los vehículos autónomos en un futuro.

Dicho lo anterior, según Barell et al., 2016, en los próximos años es probable que las flotas de vehículos de nivel 4 que se desarrollen serán desplegadas en entornos comerciales para que estas empresas, quienes recorren miles de millas al año puedan probar y ayudar a desarrollar una base de datos segura y apta para validación. En principio los vehículos serán acompañados por conductores de apoyo y supervisión en caso de fallos y para crear confianza con los clientes del servicio, pero a la larga apuntan a una fase de prueba sin conductor, pero aun en entornos controlados hasta tener respuestas positivas y seguras.

El vehículo autónomo del futuro según algunos fabricantes apunta no solo a autonomía de nivel 5, sino también, que el mismo encaja perfectamente para ser un taxi. En una entrevista Richard Holman, director de previsión y tendencias de GM, comenta que el vehículo autónomo sería un taxi perfecto y económico, comenta que en un futuro conducir un vehículo se convertirá en un lujo, así como ser dueño de tu propio avión. Según Barell et al., 2016, Los robo taxis son el futuro de los vehículos autónomos, y que los vehículos autónomos podrían llegar a sustituir hasta un 90% de los vehículos en circulación y al mismo tiempo podrían transportar el mismo número de personas.

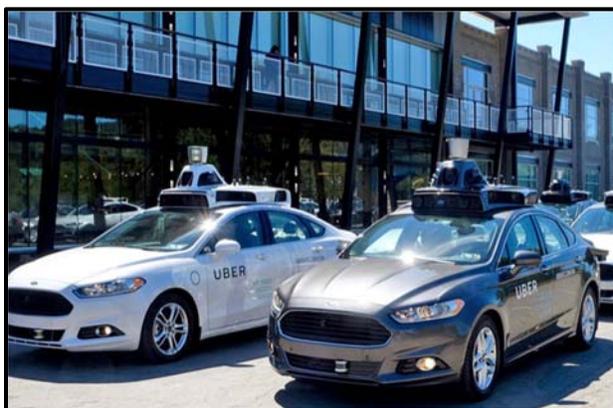


Figura 50. Robotaxis de Uber. Fte. Uber



Figura 51. Naveya Arma Autobús autónomo francés. Fte. Naveya tech

En la carrera por el dominio del mercado de vehículos autónomos se han unido empresas como BMW, Intel, Mobileye y Delphi, para obtener plataformas de computación de conducción autónomas de alto rendimiento, y al igual que ellos se han fusionado algunos otros fabricantes con el fin de obtener un mayor avance en las tecnologías, y lanzar lo antes posible coches totalmente autónomos.

Según Barell et al., 2016 estas fusiones se deben a que algunos fabricantes desean ampliar su capacidad de desarrollo en un tiempo menor, esta carrera hacia el futuro de los vehículos autónomos mientras algunos se enfocan en el desarrollo del vehículo, otros se enfocan en el desarrollo de un mapa HD del entorno, que es donde estos creen que esta la ventaja. ¿Por qué el desarrollo de mapas HD puede considerarse una ventaja?, esto se debe a que estos podrían usar los datos para hacer frente a un uso de estos sistemas autónomos en entornos rurales más complejos como grandes intersecciones, rotondas, situaciones de tráfico pesado, etc.

Apostar por el desarrollo en zonas urbanas puede ser la clave del éxito para estos fabricantes, esto se debe a que, a nivel de ventas, un vehículo nivel 4 (totalmente autónomo, pero digamos

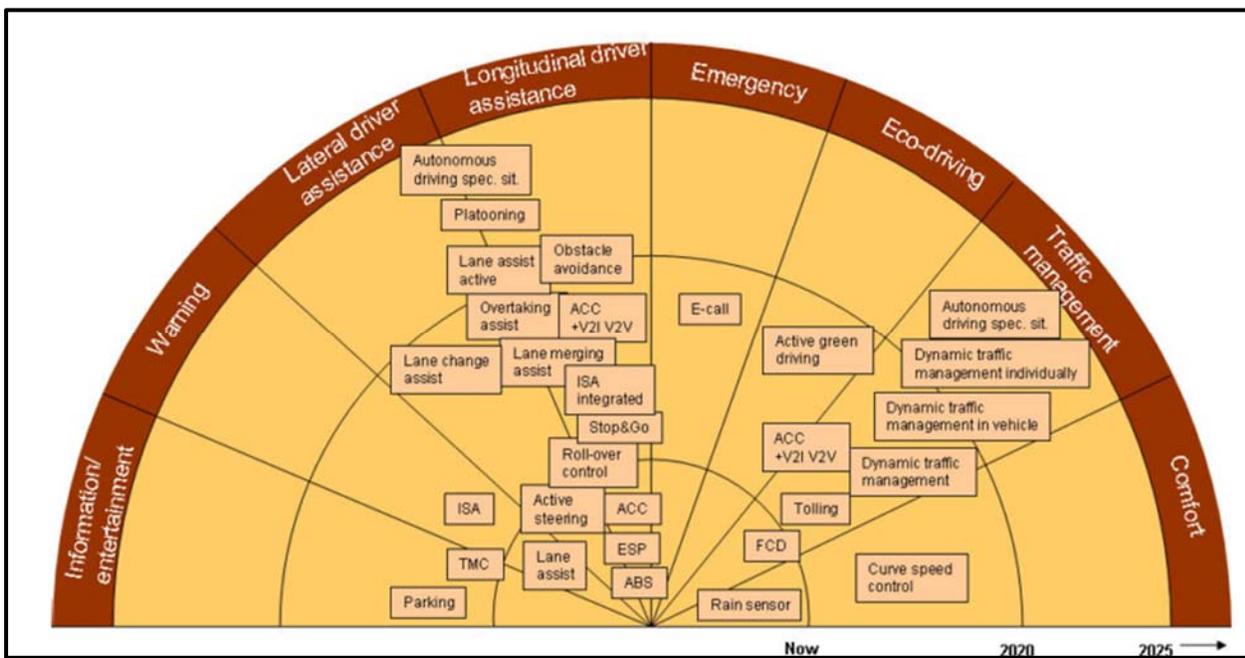


Figura 52. Desarrollo del sistema de conducción autónoma en los siguientes años. Fte. Krosse et al., 2010

que solo en carreteras), sería una buena característica de venta, pero no suficiente para producción en masa. Sin embargo, convertir estos en nivel 5 (totalmente autónomo en cualquier entorno), podría ser interesante y a la vez sorprendente ver los resultados.

Un beneficio que nos podría traer el futuro cuando esta tecnología alcance el nivel 4 y 5 de automatización es que estos podrían expandir la movilidad y el acceso a un costo reducido. Las personas de movilidad reducida, personas mayores y menores de edad serian parte de los usuarios beneficiados.

2.3. Capacidad de la infraestructura de carreteras frente a los vehículos con sistemas de conducción automatizada.

Conducir implica una interacción entre el conductor, el vehículo y la carretera. En el caso de los sistemas de conducción autónoma, el conductor actualmente sigue dentro de la ecuación, pero en forma de supervisor del sistema. Según estudios (Bidulka, Sayed, & Hassan, 2002), aproximadamente un 90% de la información requerida por el conductor se obtiene de manera visual, si las señales son confusas o engañosas, los conductores pueden evaluar de manera incorrecta el entorno vial próximo, aumentando así el riesgo del conductor. Dicho esto, nos vemos en la necesidad de condicionar/preparar la infraestructura vial para los sistemas de conducción automatizada.



Figura 53. Entorno percibido por los sensores del sistema de conducción Autónoma. Fte. Motorpasi3n

Según estudios (Ehrlich, Gruyer, Orfila, & Hautière, 2016; “Vehículos conectados Vehículos autónomos,” 2017), los sistemas autónomos de conducción presentan algunas debilidades provocadas por el alcance actual de la tecnología de sus sensores. Entre las debilidades observadas en estos estudios esta la incapacidad de percibir elementos que están situados más allá del alcance de los sensores que estos poseen o elementos de la vía que quedan ocultos debido a situaciones adversas del clima o la geometría de la vía.

Según los lineamientos de la Norma 3.1 IC de trazados (Ministerio de Fomento, 2014a), El objetivo fundamental de la infraestructura viaria es satisfacer las necesidades de movilidad y accesibilidad, garantizando todo desplazamiento de personas de una manera segura y cómoda, proyectando la misma de manera funcional. Dicho esto, se debe destacar que el objetivo que los sistemas de conducción autónoma persiguen es el de una conducción más cómoda y segura, y más allá de esto que todo el mundo pueda acceder a el uso de la misma.

Para que los vehículos autónomos puedan desplazarse de forma segura, la infraestructura de la vía deberá ofrecer características cuyos valores deberán garantizar y respetar los límites de diseño.

Estudios (Ehrlich et al., 2016) presentan una lista de algunas tareas del vehículo autónomo y la información que el sistema requiere de la infraestructura.

Función / maniobra	Información requerida
Mantenimiento de carril	Marcación de carril para guía lateral
Curva que sobrepasa la prevención	Marcaje del carril, geometría del camino, resistencia al deslizamiento de la carretera, degradación de la superficie de la carretera, límite de velocidad
Control de avance de distancia	Distancia al vehículo adelante y límite de velocidad
Prevención o mitigación de colisiones	Detección de obstáculos cercanos, ubicación de obstáculos lejanos
Evitar colisiones en atascos	información de tráfico, ubicación de atasco
Control de velocidad	Límite de velocidad legal, geometría del camino, visibilidad, resistencia al deslizamiento del camino, condiciones climáticas
Adelantamientos seguros	Geometría del camino, visibilidad, vehículos que se aproximan
Cruce de caminos seguros	Geometría de cruce, proximidad de los vehículos, estado de semáforos
Cruce seguro de rotondas	Geometría de rotonda, proximidad de los vehículos
Estabilidad del vehículo	Geometría del camino, resistencia al deslizamiento de la carretera, degradación de la superficie de la carretera, límite de velocidad

Figura 54. Información requerida por el sistema para realizar las funciones de asistencia.
Fte. Adaptación de tabla de Ehrlich et al., 2016

A medida que los niveles de automatización, las expectativas y las exigencias a la infraestructura serán mayores, lo que significa que a la larga la infraestructura deberá proporcionar cierto nivel de calidad de servicio cada vez mayor. Se deberán mejorar algunas características que afecten la legibilidad de la vía, la dinámica del vehículo o su capacidad de anticipación de eventos potencialmente críticos, estas y más características juegan un papel importante para el desarrollo seguro de las funciones de los sistemas autónomos. Ehrlich et al., 2016 en un estudio detallan una tabla de las características que deberán tomarse en cuenta para poco a poco lograr que la vía tenga un nivel de calidad de servicio ante los sistemas autónomos de conducción. (“Vehículos conectados Vehículos autónomos,” 2017)

TABLA - CARACTERÍSTICAS DE LA INFRAESTRUCTURA (lista no exhaustiva)	
Características	Uso para el vehículo autónomo o impacto sobre su seguridad
Legibilidad de la señalización horizontal	Guías para el control lateral de la trayectoria
Curvas y peraltes	Estabilidad del vehículo, prevención de salidas de calzada
Pendiente	Prevención de colisión durante el adelantamiento
Adherencia	Agarre en línea recta y en curva
Baches, roderas, fisuras	Estabilidad del vehículo
Visibilidad geométrica	Prevención de colisión durante el adelantamiento
Legibilidad de semáforos tricolores	Cruce seguro de intersecciones
Legibilidad de la señalización	Conducción de conformidad con el código de circulación
Condiciones meteorológicas	Estabilidad, control de distancias, adelantamiento seguro, adaptación de la velocidad

Figura 55. Características de la infraestructura que impactan sobre la seguridad del vehículo autónomo. Fte. “Vehículos conectados Vehículos autónomos,” 2017.

A medida que los sistemas de conducción autónoma van avanzando tecnológicamente, más urge poner atención a estos aspectos, debido a que este nivel de calidad de servicio es el que puede determinar si un sistema puede usar o no su modo autónomo en determinada vía de forma segura.

2.3.1. Características técnicas de la vía.

En el estudio realizado por Ehrlich et al., 2016, queda clara la necesidad de una vía que cumpla con ciertas características, y de igual forma en el estudio que se realizara para este trabajo de fin de master se comprobara dicha necesidad.

Para esto se consultara la norma 3.1 IC de trazados (Ministerio de Fomento, 2014a), para ver que parámetros cumplen estas características en su diseño.

El trazado de una carretera se definirá en relación con la velocidad que se estima que van a circular los vehículos en condiciones de comodidad y seguridad. Para que se puedan realizar las distintas maniobras dentro de este trazado en condiciones de comodidad y seguridad, se necesitara una visibilidad mínima, la cual dependerá de la velocidad de los vehículos y del tipo de maniobras requeridas.

La visibilidad juega un papel importante en la vía no solo para el conductor sino también para los nuevos integrantes de la vía, los sistemas autónomos de conducción. La visibilidad de parada de un vehículo viene definida como la distancia que existe entre un vehículo y un obstáculo situado en su trayectoria, en el momento en que el mismo pueda ser visto sin que luego desaparezca del campo visual.

El trazado en planta de una carretera se compondrá de una correcta combinación de los siguientes elementos: Alineación recta o recta, Alineación circular o Curva circular y curva de acuerdo o transición.

Alineación recta o recta

Es un elemento del trazado que está indicado en carreteras convencionales para obtener oportunidades de adelantamiento suficientes y en otros tipos de carretera para hacer que las mismas se adapten a condicionamientos externos (infraestructuras existentes, condiciones urbanísticas, terrenos llanos, etc.)

En estos elementos según la norma 3.1 IC de trazados, se van limitando las longitudes mínimas y máximas lo que permite acomodar la conducción a situaciones de deslumbramientos, cansancio, exceso de velocidad, etc. Las alineaciones rectas o rectas no limitan de ninguna forma lo que es los sistemas de conducción automatizada.

Curvas

Estas juegan un papel muy importante en el constante avance de las tecnologías de conducción, debido a que una buena percepción de las curvas puede hacer que estos sistemas

avancen en calidad de automatización. La necesidad de una buena percepción de las curvas para estos sistemas es la razón por la que se han hecho tantos estudios al respecto, los mismos viendo diferentes aspectos como: curvas horizontales, curvas verticales, coordinación del trazado, consistencia del trazado, etc. (Bella, 2014; Bidulka et al., 2002; Bosetti, Da Lio, & Saroldi, 2015; David González, Pérez, Lattarulo, Milanés, & Nashashibi, 2014; Hassan & Easa, 2003; Richl & Sayed, 2005)

Curvas circulares

Es importante entender como los conductores perciben las curvas horizontales, para así poder programar una correcta percepción de las curvas en los sistemas autónomos de conducción. El diseño adecuado de las curvas horizontales es uno de los factores más importantes para mejorar la seguridad del tráfico.

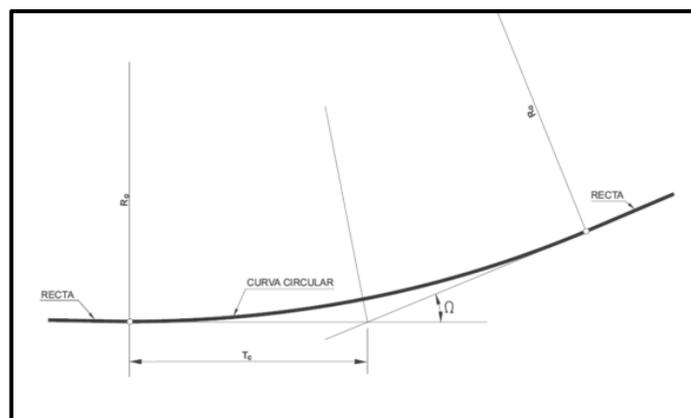


Figura 56. Ejemplo de curva circular. Fte. Norma 3.1 IC de Trazados, Ministerio de Fomento, 2014a

Incluso si la alineación de la vía este diseñada correctamente, aun se pueden presentar situaciones en la que dicha alineación pueda causar a los conductores una percepción errada de las curvas u otro elemento de la vía. Estas percepciones erróneas de la vía podrían tener un impacto negativo en la seguridad de la vía.

Estas curvas dependiendo de la velocidad fijada se determinará el radio mínimo en función de variables como lo son: peralte, rozamiento transversal máximo movilizado, visibilidad de parada (en toda su longitud), coordinación de planta y alzado (para evitar pérdidas de trazado, orientación, y dinámica).(Ministerio de Fomento, 2014a)

Algunos estudios prestaron atención a como el conductor se comportaba ante curvas horizontales en diferentes pero complementarios enfoques. El primer enfoque estuvo relacionado con que velocidad adoptan los conductores en una curva horizontal de radio específico. El segundo enfoque estuvo centrado en como los conductores perciben esta curva horizontal. (Bidulka et al., 2002; Hassan & Easa, 2003)

En estos estudios se detectó la importancia que tiene la percepción de este tipo de curvas para los conductores. La evidencia experimental resultante en este y otros estudios, demostraron la posibilidad de una percepción errada ante este tipo de curvas. Se cree que la mala

coordinación entre curvas horizontales y verticales pueda ser la causante de esta percepción errada.

Curvas de Acuerdo o transición

Las curvas de acuerdo o transición según la norma de trazados 3.1 IC, tiene como objetivo evitar que se formen discontinuidades en la curvatura del trazado, por lo que, en su diseño las mismas deberán cumplir con las condiciones de seguridad y comodidad necesarias.

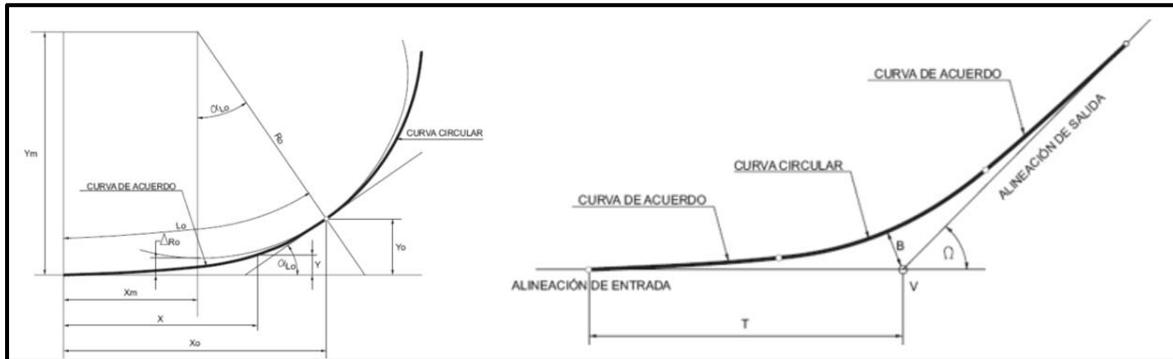


Figura 57. Curvas de acuerdo o transición. Fte. Norma 3.1 IC de trazado, Ministerio de Fomento, 2014a

Las curvas con acuerdos vienen limitadas por muchas variables para que las mismas tengan un correcto funcionamiento. Entre las limitaciones de este tipo de curvas esta: la variación de la aceleración centrífuga en el plano (aquella que no está compensada por el peralte); por transición de peralte (debe limitarse por razones de comodidad en la conducción); por condiciones de percepción visual;

Acuerdos verticales

Según la norma de trazados 3.1 IC (Ministerio de Fomento, 2014a) las curvas verticales se adoptaran en todos los casos como forma de una parábola simétrica al eje vertical.

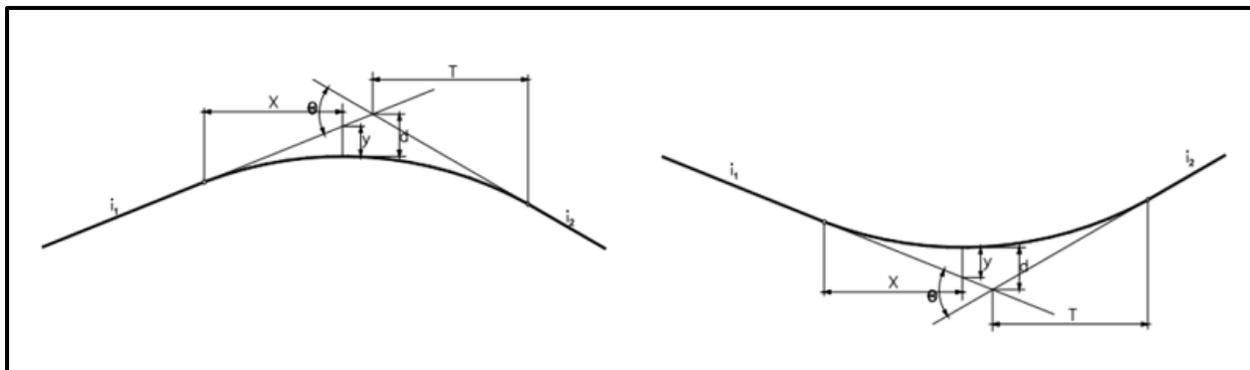


Figura 58. Acuerdos verticales. Fte. Norma 3.1 IC de trazado, Ministerio de Fomento, 2014a

Para evitar percepciones erróneas de las curvas verticales no se proyectarán trazados con acuerdos verticales consecutivos de parámetros reducidos, dependiendo así de la longitud de la curva del acuerdo y este parámetro.

En el momento de diseñar estas curvas se deberán tomar consideraciones de visibilidad y de percepción visual para así asegurar que el conductor no tenga problemas cuando se encuentre ante este tipo de curvas.

Las normas de diseño de algunos países (3.1 IC de trazados, AASHTO, etc.), invitan a evitar este tipo de situaciones de superposición de curvas verticales y horizontales y, de no ser posible esto, indican la necesidad de que estas curvas sean diseñadas con longitudes del mismo orden de magnitud. Se indica la necesidad de evitar este tipo de combinaciones debido a que las mismas podrían causar efectos importantes no deseados.

Varias investigaciones han señalado que la ocurrencia de una percepción errónea aumenta a medida que la alineación de va haciendo más compleja, y que podría ser más relevante en condiciones en las que se superpongan las curvas horizontales con curvas verticales. También han señalado que los conductores perciben el radio de una curva horizontal de manera diferente cuando estas están combinadas con curvas verticales. (Bidulka et al., 2002; Hassan & Easa, 2003; Richl & Sayed, 2005; F. Wang & Easa, 2009)

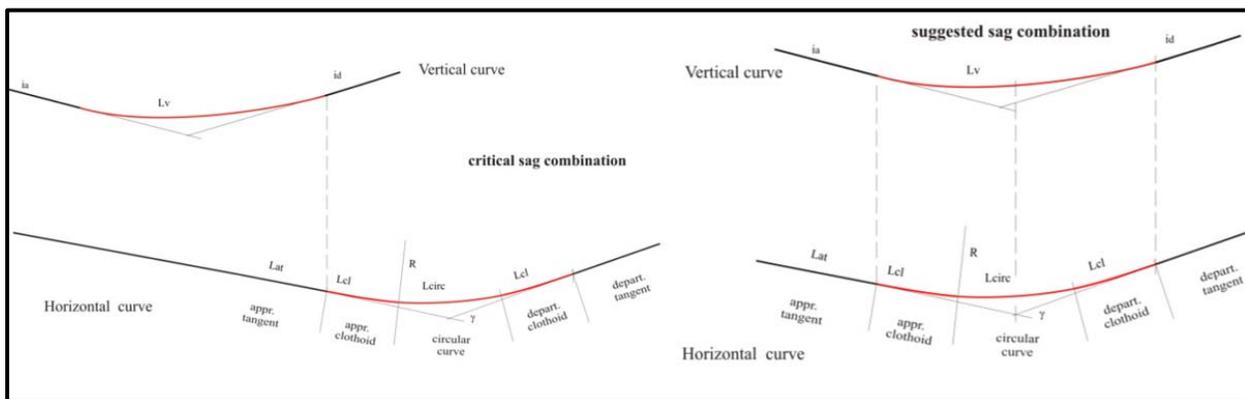


Figura 59. a) Combinación crítica de acuerdo. b) Combinación sugerida de acuerdo. Fte. Bidulka et al., 2002

Coordinación del trazado en planta y alzado

La coordinación de planta y alzado debe ser de forma tal que el usuario pueda circular por ella en condiciones de comodidad y seguridad. Según la norma de carreteras 3.1 IC (Ministerio de Fomento, 2014a) las principales situaciones que suelen afectar de manera significativa la coordinación de planta y alzado, y de igual forma crear una percepción errada se clasifican en:

- Situaciones de pérdida de trazado: Las mismas consisten en la desaparición de un tramo de la vía en una alineación recta del campo visual del conductor. Puede llegar a ser simple o múltiple en caso de que se pierda la visual en varios tramos.

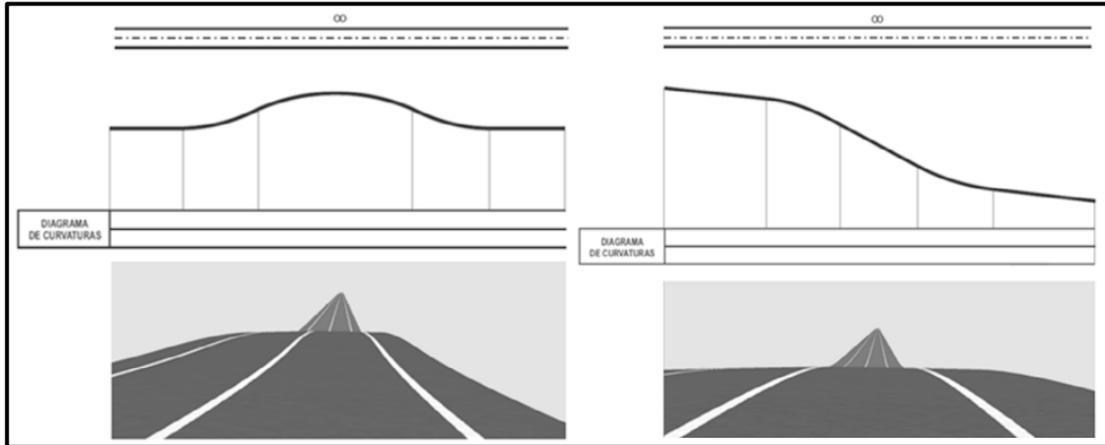


Figura 60. Esquemas de pérdida de trazado. Fte. Norma 3.1 IC de trazado, Ministerio de Fomento, 2014a

- Situaciones de pérdida de orientación: Es la desaparición total de la vía del campo visual del conductor, creando así incertidumbre sobre la posible trayectoria que se debe seguir.

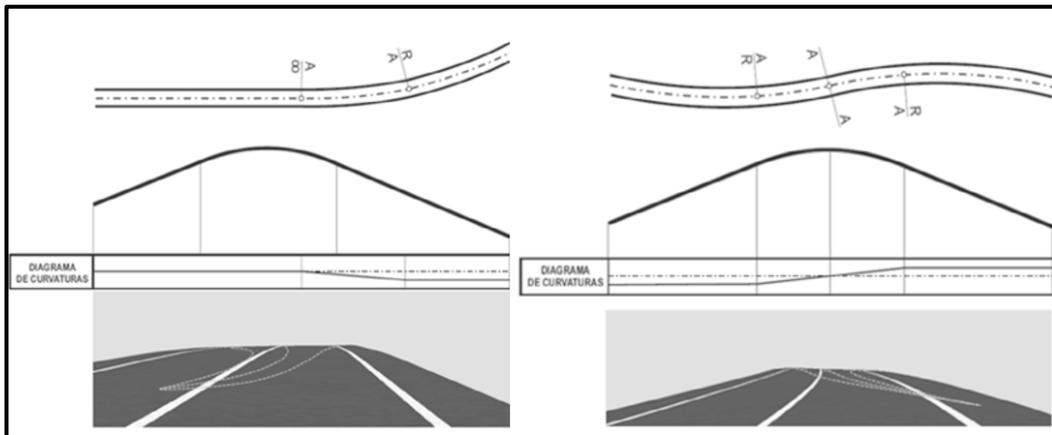


Figura 61. Esquemas de pérdida de orientación. Fte. Norma 3.1 IC de trazado, Ministerio de Fomento, 2014a

- Situaciones de pérdida dinámica: Desaparición parcial de la vía, y en particular de alguna de sus características (peralte, longitud, etc.).

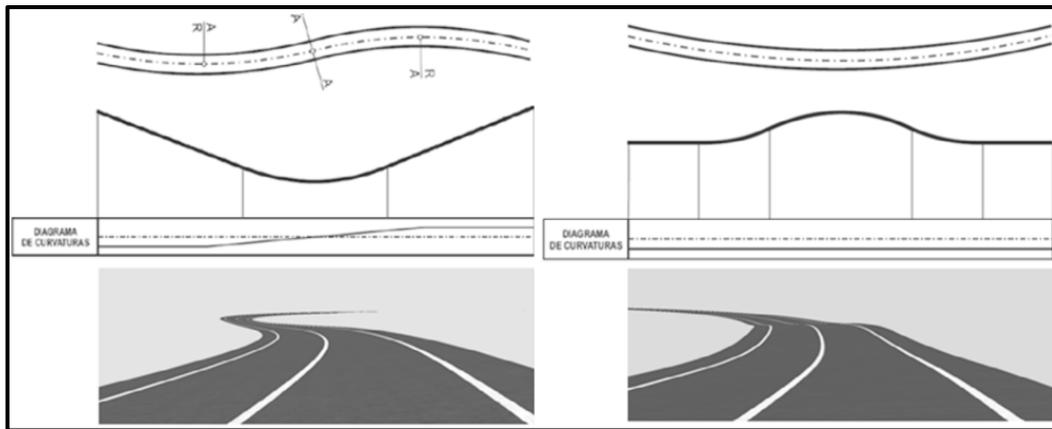


Figura 62. Esquemas de pérdida dinámica. Fte. Norma 3.1 IC de trazado, Ministerio de Fomento, 2014a

- Situaciones combinadas o con cierta desproporción entre los elementos del trazado en planta y alzado, lo que provoca una diferencia de curvatura en los elementos.

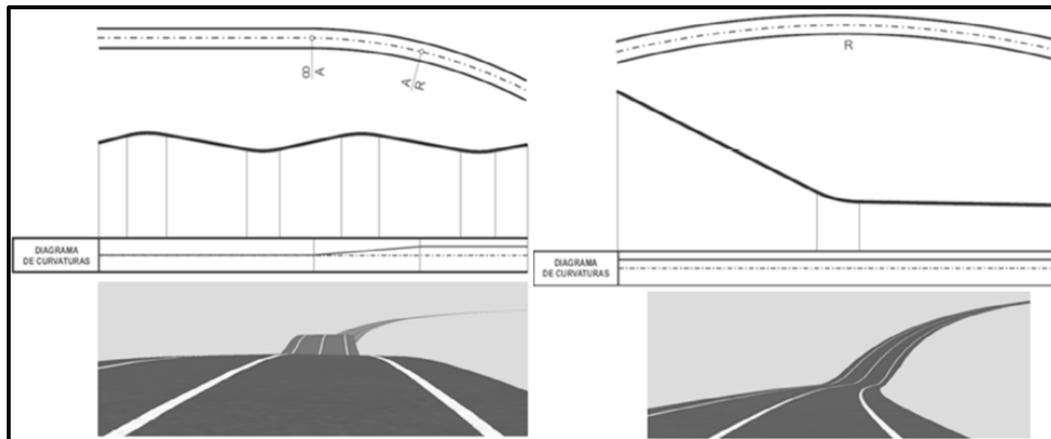


Figura 63. Esquemas de situaciones combinadas. Fte. Norma 3.1 IC de trazado, Ministerio de Fomento, 2014a

Para conseguir una buena coordinación planta-alzado se deben tener en cuenta las siguientes condiciones: Los puntos de tangencia del acuerdo vertical, deben coincidir con una curva horizontal, estando estos mismos dentro de la clotoide y lo más alejados del punto donde el radio tiende a infinito; y otras condicionantes dependientes de la velocidad de proyecto.

Según los fabricantes de Hyundai, 2017a, 2017b aseguran que el vehículo presenta desconexión en presencia de este tipo de fenómeno, ya que el sistema pierde la visibilidad y, ante esto alerta al conductor para que retome el control del sistema.

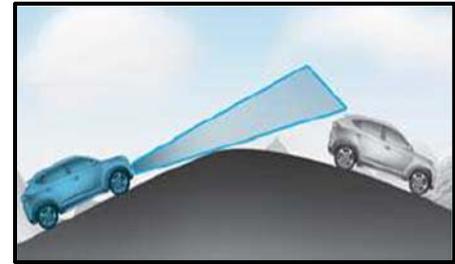


Figura 64. Esquema para alertar una desconexión en casos de este tipo. Fte. Hyundai.

Visibilidad

La necesidad de la buena visibilidad aumenta aún más cuando nos enfrentamos a alineaciones complejas. Algunas normativas de diseño exigen a los diseñadores que proporcionen a los conductores una distancia visual suficiente para detenerse (visibilidad de parada), pasar (adelantamiento) y de toma de decisiones.

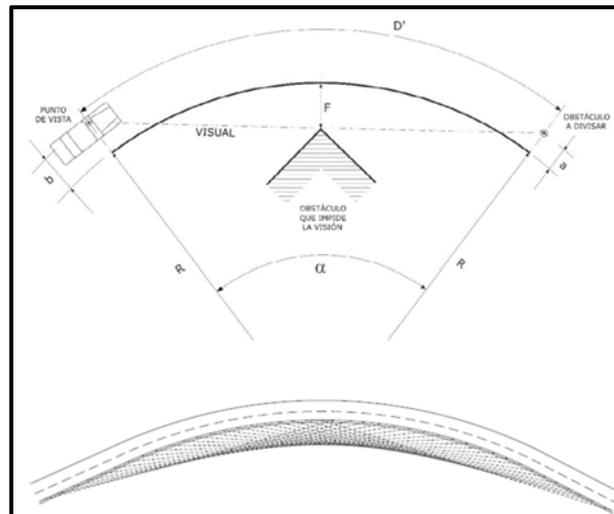


Figura 65. Visibilidad en planta de curvas circulares. Fte. Norma 3.1 IC de trazado, Ministerio de Fomento, 2014a

- Visibilidad de parada: distancia que existe entre un vehículo y un obstáculo situado en su trayectoria, en el momento que el conductor pueda visualizarlo antes de que el mismo desaparezca.
- Visibilidad de adelantamiento: distancia disponible a lo largo del eje que separa ambos sentidos de circulación, entre la posición del vehículo que efectúa la maniobra de adelantamiento y la posición del vehículo que circula en sentido opuesto, en el momento que pueda ser visto y sin que luego desaparezca de su campo visual hasta finalizar la maniobra.
- Visibilidad de decisión: distancia medida a lo largo de la trayectoria del vehículo, en la que el conductor ante una situación inesperada, pueda percibir, reconocer, valorar el riesgo, y adoptar una velocidad y trayectoria adecuada con seguridad y eficiencia.

Sin embargo, algunas veces una distancia visual suficiente, tal como lo exigen las guías de diseño, puede no ser suficiente para garantizar que los conductores puedan percibir las características de manera correcta. En general, el ojo humano actúa como una cámara que registra imágenes, y la percepción humana hace el procesamiento y análisis de toda esta información.

Dicho lo anterior, podemos ver que los sistemas autónomos de conducción son bastantes parecidos al humano en la recopilación y procesamiento de información de visibilidades, las mismas juegan un papel importante para los sistemas y, debido a esto los avances en la tecnología de sensores aún se están trabajando para aumentar la capacidad de los mismos.

Consistencia del diseño geométrico

La consistencia del diseño geométrico puede definirse como el nivel de adecuación entre el comportamiento que permite las expectativas de los conductores y la geometría de la vía (Camacho-Torregrosa, Pérez-Zuriaga, Campoy-Ungría, & García-García, 2013). Un alto grado de similitud entre estas variables puede dar como resultado una conducción agradable, y en caso contrario, las expectativas del conductor serán violadas, produciendo así un comportamiento erróneo y lleno de sorpresas, llevando esto a una posible situación de riesgo.

La consistencia en el trazado es de vital importancia tanto para la conducción convencional como para la autónoma, debido a que tanto el humano como la máquina ante eventos imprevistos del trazado pueden tener un comportamiento errado o en caso de la máquina de duda y posteriormente de cesión de control. Más adelante en este trabajo de fin de master nacerá un nuevo concepto de consistencia tomando en cuenta a la conducción automatizada.

2.3.2. Características técnicas de la señalización, balizamiento y los sistemas de contención.

Según el artículo 131 del reglamento general de circulación *“La señalización es el conjunto de señales y órdenes de los agentes de circulación, señales circunstanciales que modifican el régimen normal de utilización de la vía y señales de balizamiento fijo, semáforos, señales verticales de circulación y marcas viales, destinadas a los usuarios de la vía y que tienen por misión advertir e informar a éstos u ordenar o reglamentar su comportamiento con la necesaria antelación de determinadas circunstancias de la vía o de la circulación.”* (Ministerio de la Presidencia, 2015)

De igual forma en el artículo 166, describe el objetivo de las marcas viales, las mismas tiene por objeto guiar a los conductores, y de igual forma advertir o guiar a los conductores.

Las marcas viales tienen como objeto:

- Delimitar carriles de circulación.
- Separar sentidos de circulación
- Indicar el borde de la calzada.
- Delimitar zonas excluidas a la circulación regular de los vehículos.
- Reglamentar la circulación, especialmente el adelantamiento, la parada y el estacionamiento.

- Repetir o recordar una señal vertical.

El fin inmediato de las marcas viales es aumentar la seguridad, eficacia y comodidad de la circulación, por lo que es necesario que las mismas se tengan en cuenta y se les de mantenimiento adecuado. Para los vehículos automatizados, estas marcas viales longitudinales desempeñan una función primordial de guiado, mucho más trascendente que para la conducción humana. Los patrones de diseño de estas marcas viales establecidos en la norma (Ministerio de Fomento, 1987) estaban pensados para la conducción convencional, por lo que podría haber problemas al momento de utilizarlas en los sistemas autónomos.

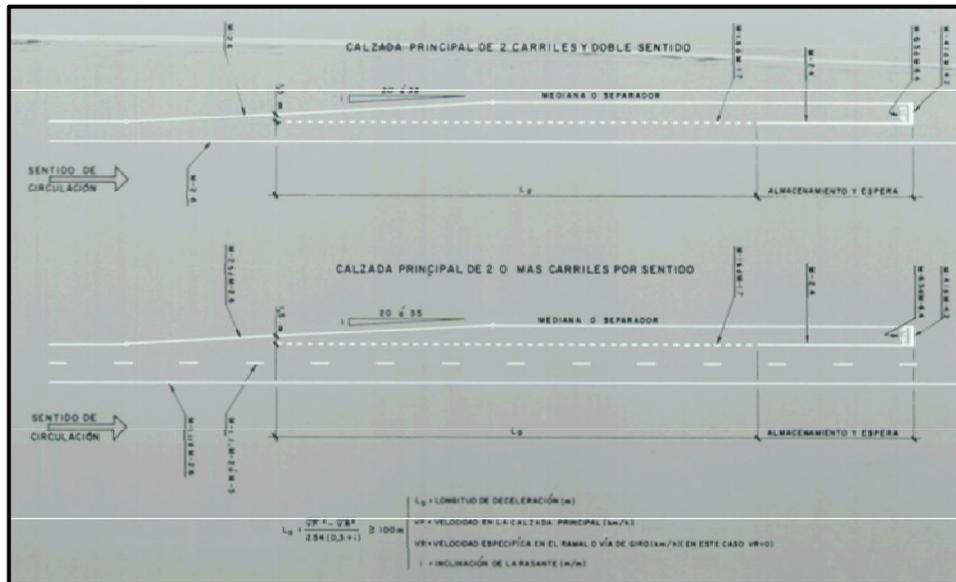


Figura 66. Esquema de marcas viales según cantidad de carriles y sentido. Fte. Instrucción de carreteras 8.1 IC: Marcas viales, Ministerio de Fomento, 1987

Las marcas viales según la norma pueden ser: (Ministerio de Fomento, 1987)

- Longitudinales continuas.
- Longitudinales discontinuas.
- Longitudinales continuas adosadas a discontinuas.
- Transversales.
- Flechas.
- Inscripciones.
- Otras marcas

Longitudinales discontinuas: Significa que ningún conductor debe circular sobre estas, salvo cuando sea necesario y la seguridad de la circulación lo permita. Destinadas a delimitar los carriles con el fin de guiado.

Longitudinales Continuas: Una marca longitudinal consistente en una línea continua sobre la calzada significa que ningún conductor con su vehículo o animal debe atravesarla ni circular con su vehículo sobre ella ni circular con su vehículo sobre ella ni, cuando la marca separe los dos sentidos de circulación, circular por la izquierda de aquella.

Por otra parte, en las “recomendaciones sobre el balizamiento de carreteras” se define balizamiento como dispositivos retro reflectantes de distintas formas, colores y tamaños, instalados en la plataforma de la carretera, fuera de ella o en los sistemas de contención de vehículos y los mismos diseñados específicamente para el guiado óptico, pudiendo disponer, además, de iluminación propia. (Ministerio de Fomento, 2011)

La principal función de los balizamientos en casos de conducción convencional es captar la atención del conductor de manera que este pueda percibir las características de la vía con antelación suficiente y así prepararse para hacer las maniobras necesarias.

Los vehículos autónomos con los avances tecnológicos que ha tenido el sector de sensores y cámaras, ha desarrollado tecnologías con la capacidad de monitorear el entorno. Estas tecnologías son necesarias para que el vehículo pueda detectar las señales de tránsito tanto verticales como horizontales. (Peters, Zhang, & Vishwanathan, 2017)



Figura 67. Percepción de Señalización vertical.
Fte. ITS International

En las pruebas realizadas en este trabajo, se podrá observar los fallos que se han encontrado con respecto al funcionamiento del sistema de guiado por marcas viales ante el paso por convergencias y divergencias. Veremos cómo reacciona el sistema al sistema que en principio fue creado para el entendimiento humano y en la actualidad se considera que el mismo debe revisarse para su posterior modificación.

La problemática citada anteriormente va regulada por una norma que es de hace ya 31 años, y que la misma ya debería actualizarse y contemplar los vehículos autónomos en dichas modificaciones. (Ministerio de Fomento, 1987)

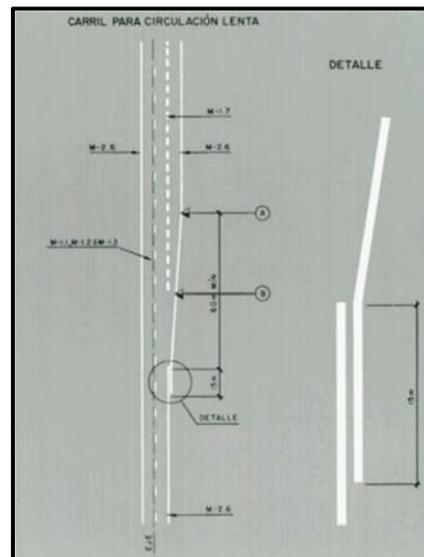


Figura 68. Esquema de marcas viales. Fte. Instrucción de carreteras 8.1 IC: Marcas viales, Ministerio de Fomento, 1987

Cabe destacar que la normativa en todos los países (Francia, Alemania, Italia, Suecia, China, etc.) no es igual con respecto a las marcas viales en entradas, salidas, convergencias y divergencias, ya que, se pudo observar distintas configuraciones en las marcas viales en las salidas y entradas, tanto como en las convergencias y las divergencias.



Figura 69. Salida CV-35, valencia, España. Fte. Google Earth



Figura 70. Entrada a carretera 648, Frankfurt, Alemania. Fte. Google Earth

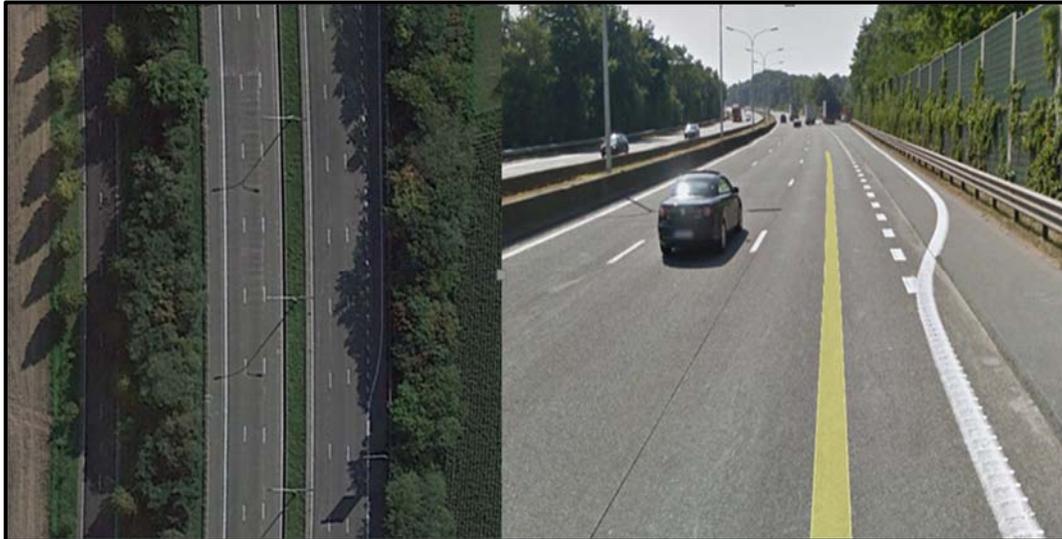


Figura 71. Salida de la A12, Bruselas, Bélgica. Fte. Google Earth



Figura 72. Salida de la A1, Nápoles, Italia. Fte. Google Earth

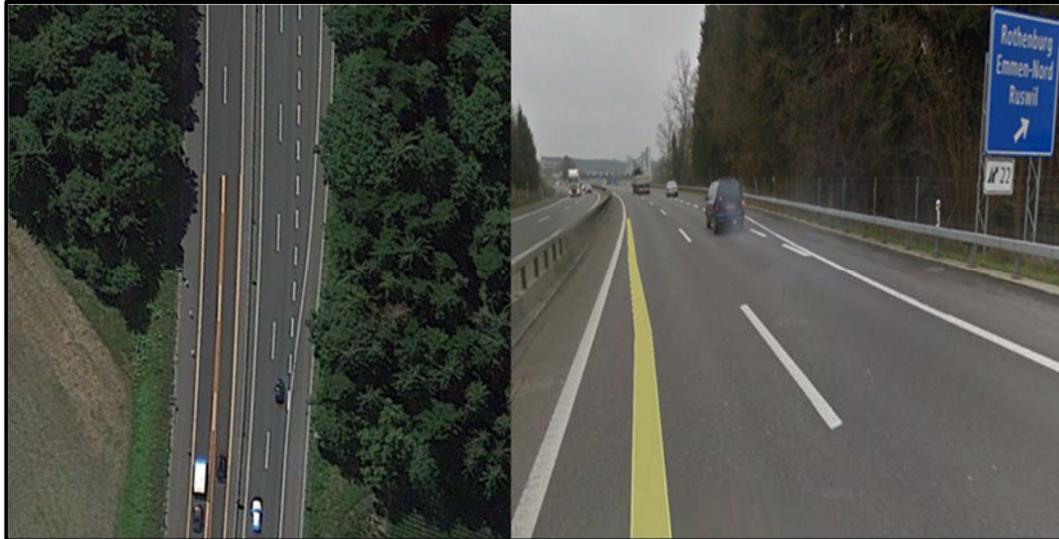


Figura 73. Salida de la 2, Suiza. Fte. Google Earth

2.3.3. Gestión de firmes

En la actualidad se exige cada día más que el grado de calidad de las carreteras sea mayor, se quieren trayectos cómodos, seguros, y con unos niveles de servicio elevados. Por este motivo existen los indicadores de calidad que nos permiten conocer el estado de ciertos elementos de las redes de carreteras y poder actuar de manera óptima sobre la condición de los mismos.

La gestión de firmes en definición es un programa que nos ayuda a controlar mejor el estado de las carreteras y a tomar las medidas oportunas en el momento más oportuno y con el menor de los costes.

Este apartado estará centrado en uno de los indicadores de calidad que su mal estado impacta no solo la vía misma, sino que puede impactar la comodidad y la seguridad de la conducción, este indicador es el Índice de Regularidad Internacional (IRI). El IRI según la norma NLT-330/98 es un valor promedio sobre una longitud L. Los valores del IRI dependen del valor elegido para L. Para el cálculo normalizado de los valores del IRI se utilizará como longitud L el hectómetro. (CEDEX, 1998)

En otros estudios el IRI se define como la suma de aceleraciones verticales no deseadas que sufre el usuario de una carretera, al circular por ella, las cuales son provocadas por las desviaciones del perfil longitudinal real respecto al perfil teórico de proyecto. (Gutiérrez Ruiz, 2004)

Estos estudios también indican que la uniformidad de la capa de rodadura de una carretera es un factor fundamental para minimizar el impacto ambiental del tráfico, ya que esto puede reducir desde el combustible, hasta el mantenimiento del vehículo que circule por la vía. Un mal IRI puede generar desgaste en los vehículos y neumáticos, incomodidad en los usuarios y, con respecto a la seguridad, destacar que un IRI alto puede suponer en una falta de estabilidad en curvas y elevadas distancias de frenado.

Dicho esto, el impacto que un mal IRI puede tener sobre los vehículos autónomos puede ser significativo, ya que el mismo funciona a través de sensores de laser e imágenes y, las mismas podrían suponer algún fallo relacionado con estas vibraciones o cambios repentinos en el pavimento. Cabe destacar, que durante los recorridos realizados para la toma de datos el vehículo autónomo presentó problemas en el guiado de marcas viales ya que percibió de manera errada las mismas con unas fisuras selladas en la vía, dando esto un ejemplo de las pequeñas confusiones a la que puede llevar un desperfecto en la vía. En un futuro se debe tomar en consideración una buena gestión de los pavimentos, y asegurar que los IRI estén dentro de los parámetros estipulados en las Normativas pertinentes (CEDEX, 1998; Ministerio de Fomento, 2014b).



Figura 74. Afecciones del pavimento. Fte. RoadScanners

Durante las observaciones de esta investigación, se pudo presenciar la causa de una desconexión relacionada al sellado de grietas longitudinales en la vía, el mismo provocando una confusión al sistema en el momento de la lectura de las marcas viales. Este fenómeno se intensificaba cuando el sol le reflejaba el material de sellado como se observa en la Figura 75.



Figura 75. Sellado de fisuras longitudinales del pavimento.

2.3.4. Normativa.

En este apartado se estará revisando la normativa que regula en principio la conducción convencional, para luego ver como se han adaptado estas normativas a los sistemas de conducción autónoma, que limitaciones existen actualmente para estos sistemas de conducción.

Dicho lo anterior hay que conocer que normativa regula los vehículos de motor. En España, la circulación de vehículos de motor la regula la Ley sobre tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial (texto refundido aprobado por el Real Decreto Legislativo 6/2015, 30 de octubre)(Ministerio de Interior, 2015) y por el Reglamento general de circulación (Ministerio de la Presidencia, 2015).

En un marco normativo internacional debemos conocer la convención de Viena y lo que dicen sus artículos acerca de los vehículos de motor. En específico destacar el artículo 8, apartados 1 y 5 de la convención de Viena de 1968(Naciones Unidas, 2007):

- “(1) Todo vehículo en movimiento o combinación de vehículos deberá tener un Conductor.
- (5) Todo conductor deberá poder controlar en todo momento su vehículo.”

Sin embargo, en marzo del 2014 el grupo de trabajo sobre la seguridad vial aprobó una enmienda en dicha convención en la que se especifica:

“los sistemas que influyen en la conducción de los vehículos, así como otros sistemas que puedan ser anulados o apagados por el conductor, se consideran conformes con el artículo 8”

Por lo tanto, la normativa aun siendo modificada exige que cada vehículo tenga un conductor responsable, limitando así los niveles avanzados de conducción autónoma. En el futuro del vehículo autónomo deberá plantearse una nueva enmienda que permita a los vehículos circular sin la intervención del conductor.

En la actualidad a nivel nacional, se han llevado a cabo algunas actuaciones que regulan de alguna forma los sistemas de conducción autónoma, estas actuaciones han sido:

- Instrucción 15/V-113 sobre “Autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general” (DGT, 2015)
- Instrucción 16 TV/89 sobre “Estacionamiento asistido de vehículos a motor” en la cual se pretende visibilizar los vehículos con estas funciones y así facilitar el uso de la misma.

2.4. Seguridad vial

El cansancio, desatención, somnolencia, imprecisión en la percepción del entorno vial, escasos reflejos, son algunos de los errores que el ser humano puede cometer estando conduciendo un vehículo. Dicho esto, el factor humano según estudios el 90% de los casos de accidentes se deben al factor humano. (Gómez Recio, 2016; Tomás Martínez et al., 2017; Tráfico y Seguridad Vial, 2017)

Según el balance de seguridad vial durante el 2017 el número de fallecidos en vías interurbanas fue de 1,688 personas (en este valor se incluyen todas las comunidades Autónomas). Clasificando esto en el mismo reporte se da a conocer que el 23% de los accidentes ocurridos durante el 2017 fueron en autopistas o autovías y, 77% a los fallecimientos en carreteras convencionales. (DGT, 2017)

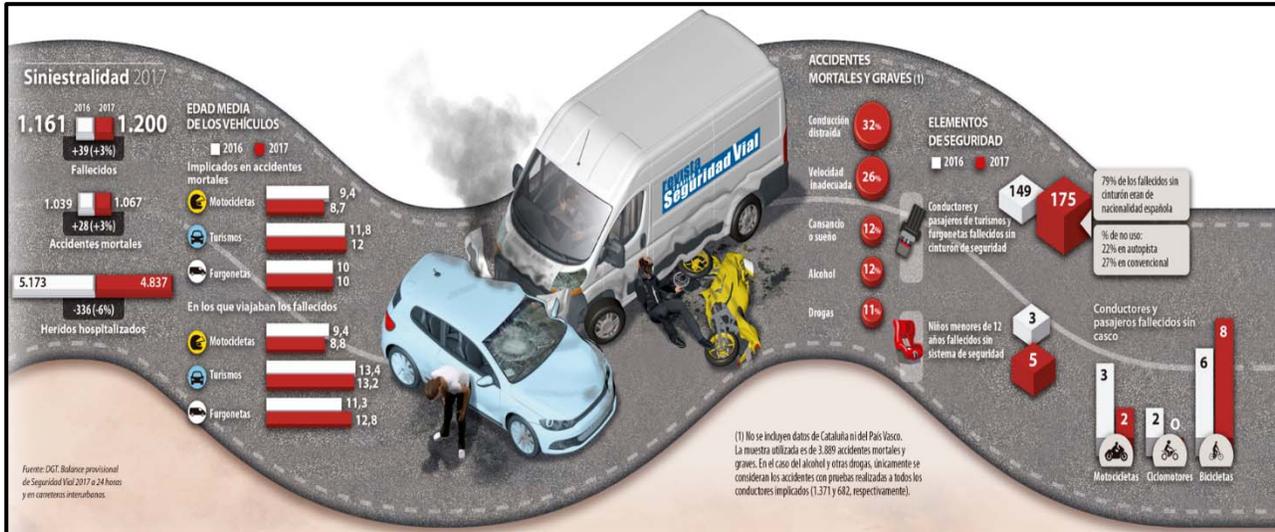


Figura 76. Infográfico de siniestralidad durante el 2017 (no se incluyen valores de Cataluña ni del país vasco). Fte. DGT

En el siguiente infográfico tomado del balance de seguridad vial del 2017 se pueden observar los factores contribuyentes a los accidentes ocurridos en el 2017. (DGT, 2017)

Factores	% de accidentes mortales y graves
Conducción distraída o desatenta	32%
Velocidad inadecuada	26%
Cansancio o sueño	12%
Alcohol	12%
Drogas	11%

Figura 77. Factores contribuyentes a los accidentes ocurridos en el 2017. Fte. DGT

Históricamente se han ido creando mecanismos para poder mitigar los efectos de los errores humanos al volante. Sin embargo, queda demostrado que el factor humano en los casos de accidentalidad es insistente y no desaparece por completo. Entre estos intentos de sacar el error humano de la ecuación, se pensó en un sistema en que los vehículos fueran inteligentes y pudieran conducir por si solos interpretando el entorno vial y los sistemas de seguridad activa y

pasiva, sin importar si el conductor esté en condiciones el sistema se encargaría de todo, y así sacar el factor humano de la conducción y disminuir la accidentalidad. El vehículo autónomo fue pensado para hacer la vía más segura.

Actualmente se cuenta con vehículos autónomos de nivel entre 2-3. El nivel actual de automatización permite que el conductor ceda el control de todas las funciones críticas de seguridad en ciertas situaciones. Los accidentes debido al error humano probablemente puedan verse reducidos con el uso de estas tecnologías. Sin embargo, los fabricantes de estos vehículos recalcan que aún no se debe confiar por completo en los sistemas de nivel 2 – 3, debido a que los mismos no tienen un piloto automático sino más bien un “asistente” de conducción. (Anderson et al., 2016)

No todo ha sido color de rosa en el desarrollo de los vehículos autónomos, ya que estando estos en su fase de pruebas han tenido accidentes entre los cuales ya queda registrado dos fallecimientos. Estos accidentes quedan marcados como hitos en la historia de la conducción ya que son los primeros conocidos en 9 años que tienen estos vehículos en desarrollo. Sin embargo, ¿Cambiaría algo el hecho de que estos accidentes hayan ocurrido?, no cambiaría nada, debido a que la historia del automóvil en su desarrollo ha pasado por lo mismo desde 1896 año en el que se registró la primera víctima mortal del automóvil y, la misma no detuvo el desarrollo del automóvil. (Tomás Martínez et al., 2017)

En términos futuros hay fabricantes que aseguran que los riesgos de accidentalidad pueden seguir disminuyendo cuando el sistema alcance el nivel 4 y 5 de automatización, en especial esos accidentes provocados por la ingesta de alcohol, somnolencia, o distracción. El siguiente infográfico muestra la visión a futuro de la DGT con respecto a cómo podría evolucionar la accidentalidad con respecto a la penetración del vehículo autónomo, en el gráfico se observa cómo se apuesta al vehículo autónomo y conectado como solución a la accidentalidad viaria.

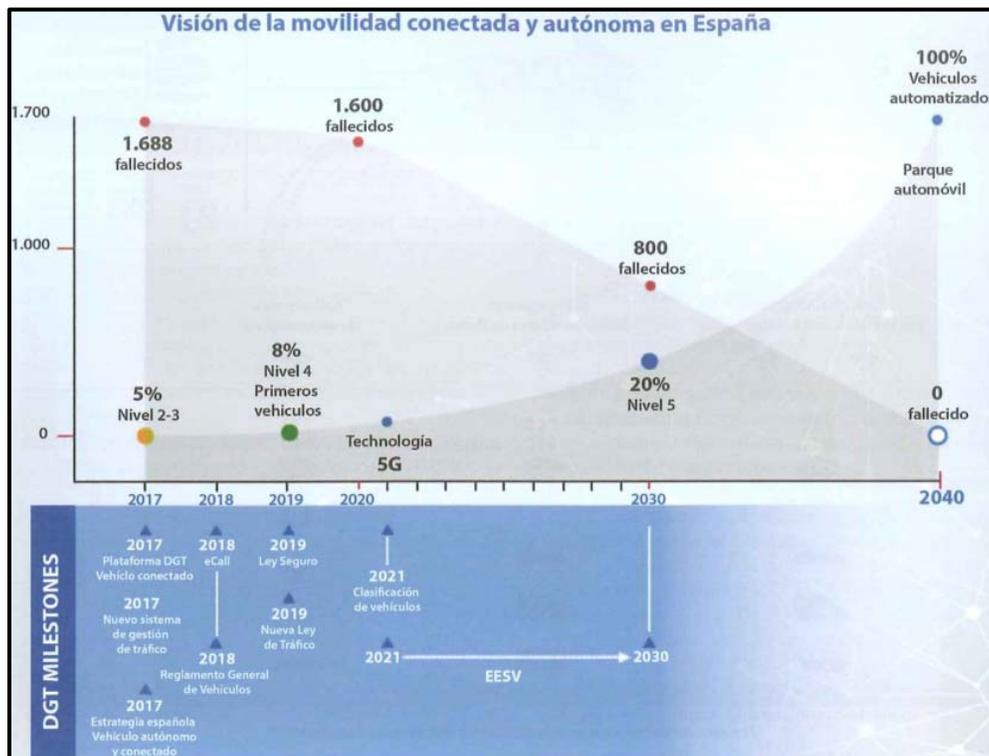


Figura 78. Visión de la movilidad conectada y autónoma en España. Fte. Revista Rutas. Tomás Martínez et al., 2017

2.5. Pronostico Económico

Ahora si podemos considerar los efectos potenciales que pueden tener los vehículos autónomos en la economía. Según Anderson et al. los vehículos autónomos pueden tener un impacto significativo en la congestión del tráfico y los costos asociados a esto. También se estima que el vehículo puede afectar al menos en tres formas: influyendo de manera directa en la cantidad de vehículos por milla de carretera recorrida, permitiendo un mayor rendimiento del vehículo en las carreteras existentes y reduciendo las demoras en el tránsito derivadas a los accidentes de vehículos, y al mismo tiempo aumentando la accesibilidad al transporte (Bagloee et al., 2016).

Según Johnson & Walker, 2016 en ocasiones las decisiones que tomamos de donde vivir y que viajes realizar están mediadas por los costos operativos del vehículo, seguro del mismo, gastos en combustible, estacionamiento disponible, mantenimiento, etc. Algunos de estos costos podrían reducirse de manera significativa con la aparición de los vehículos autónomos, debido a que los conductores quedarían en libertad de hacer actividades más productivas durante el viaje, estos vehículos pueden presentar patrones de conducción más suaves y fluidos repercutiendo esto en una reducción en el combustible. Combinando estos factores se podría tener una reducción significativa de los costos relacionados a la movilidad.

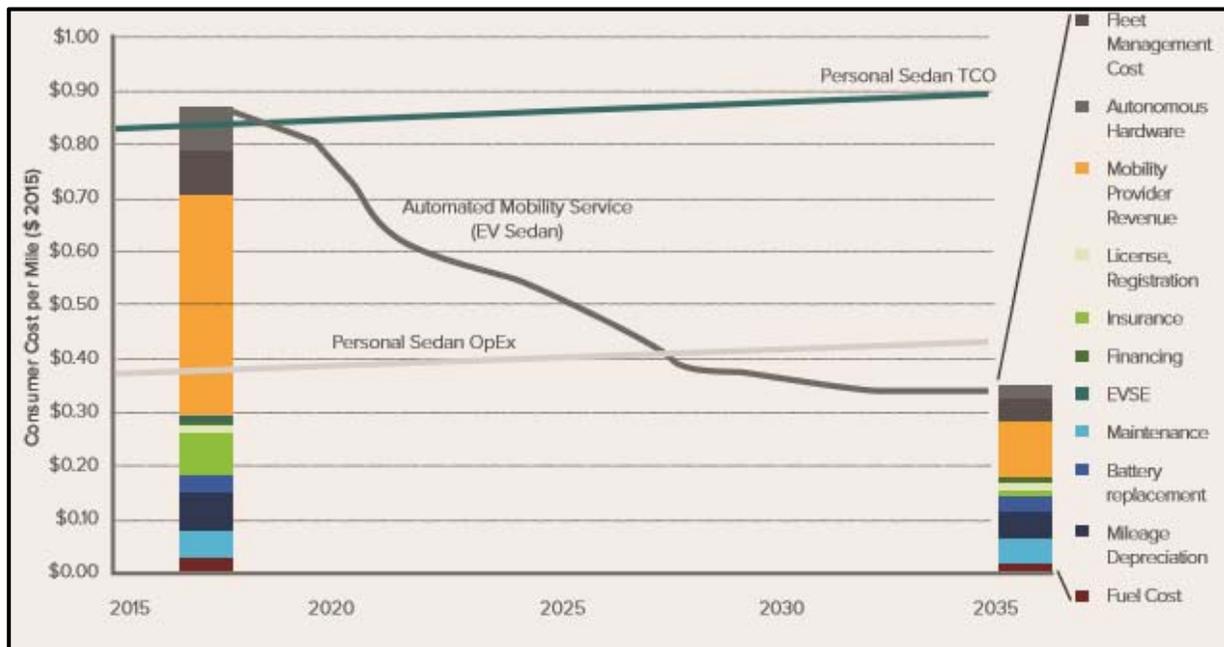


Figura 79. Movilidad automatizada vs. vehículo personal: proyección de costos a 20 años. Fte. Johnson & Walker, 2016

En función a las externalidades que el vehículo autónomo puede ayudar a eliminar, en un caso positivo los beneficios que se pueden obtener no solo afectaría a los compradores de los vehículos, sino también al público en general del sector automovilístico. Según se vayan imponiendo los vehículos autónomos puede que haya menos accidentes, lo que puede traer múltiples consecuencias económicas que irían desde un menor gasto del sistema público de

salud y aseguradoras hasta un mayor gasto en pensiones, debido al incremento de la esperanza de vida de las personas.

Según Bagloee et al. y Anderson et al. los vehículos autónomos pueden favorecer la movilidad con la aparición de autobuses y taxis autónomos, o esquemas de uso compartido de vehículo. Esto pudiendo provocar costos reducidos debido a que se excluirá el costo del tiempo y del talento del conductor, siendo esto también un punto en contra a la economía personal, ya que algunas personas se quedarán sin empleo.

Entre otros beneficios que los vehículos autónomos podrían atribuirse es que estos sistemas podrán aumentar la movilidad de aquellas personas que no tienen edad para conducir, discapacitados, personas con problemas de salud. En otros estudios prevén que comprar un vehículo en el sector privado podría pasar al segundo plano ya que, con la existencia de sistemas de car-sharing y taxis autónomos a bajos costos los mismos serían una mejor opción de movilidad para aquellas personas que no utilizan de manera continua el vehículo. (Bagloee et al., 2016; Bengler et al., 2014; International Association of PublicTransport - UITP, 2017; Recio, 2016)

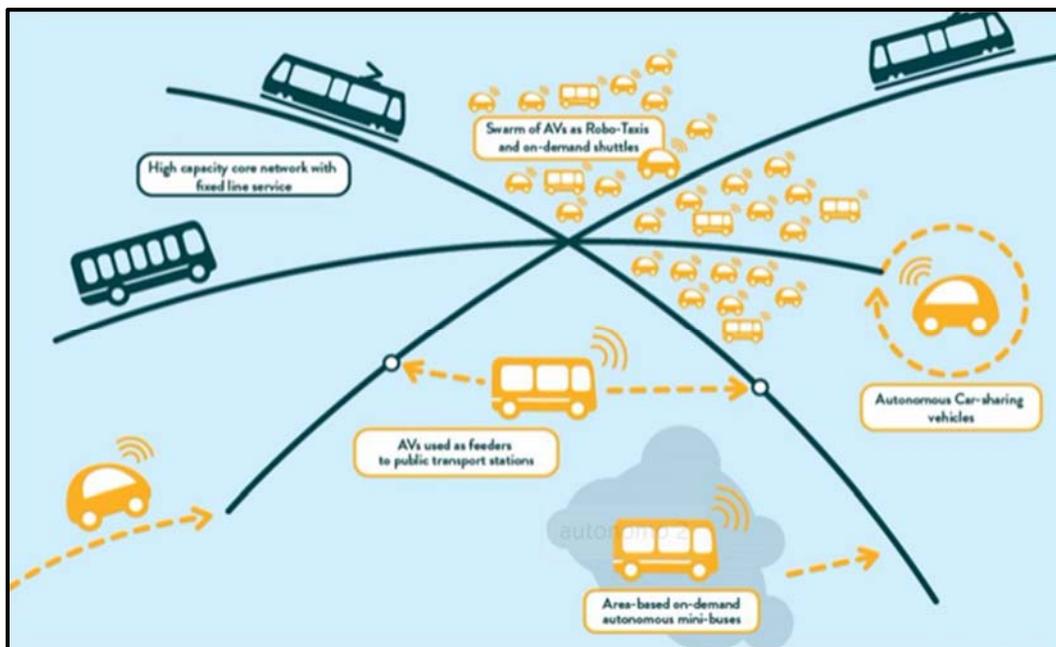


Figura 80. posibles aplicaciones de vehículos autónomos como parte de un sistema de transporte público diversificado. Fte. UITP

Anderson et al. Cree que los mayores beneficios que se pueden obtener a corto y mediano plazo es con los vehículos del nivel 3 y 4 de autonomía, ya que los mismos poseen las características para poder mitigar la pérdida de tiempo en carreteras, el exceso de consumo de combustible, las emisiones de los gases de efecto invernadero, y algunos otros factores. Se deberían revisar todos los costos asociados al vehículo autónomo ya que el mismo podría tener un impacto positivo en la eficiencia de la economía, en un futuro estos costos reducidos podrían ser la motivación para la compra o alquiler de estos vehículos.

2.6. Conclusiones del análisis del estado del arte.

Sin duda alguna, en un futuro próximo, los vehículos autónomos formarán parte importante de los sistemas modernos de transporte. Ya es un hecho que estos sistemas de nivel 3 están formando parte del entorno de tráfico real. Se espera que con la inserción a la larga de estos sistemas de conducción en todos los sistemas y procesos a lo largo de la cadena de gestión de tráfico puedan hacer que la gestión del tráfico sea más eficiente, con latencias más breves y efectivas.

La automatización está cada vez más cerca, y a la luz de estos cambios rápidos en los sistemas inteligentes de transporte, se debe hacer énfasis en el sistema educativo, para que el mismo pueda alinearse con las nuevas tecnologías y, así poder enseñar a los conductores estos nuevos sistemas de conducción. Así mismo, la ingeniería de tránsito en universidades debería de introducir esta variable dentro de sus estudios ya que este será un tema importante en algunos años. Los sistemas de conducción autónoma es un tema multidisciplinario que en unos años será de interés para todos, ya que seremos posibles usuarios del mismo sistema.

La evidencia disponible apunta, en principio, a que la explotación de estas tecnologías por parte de los gobiernos se basa principalmente en las mejoras de la seguridad vial, y por otra parte los operadores de carreteras se apoyan en una mejoría evidente como lo es una eficiencia en el mantenimiento y el funcionamiento de estas carreteras.

Existen en la actualidad factores referentes al trazado y la señalización, que pueden afectar el desempeño de los sistemas de conducción automatizada. Llegando a conocer qué factores afectan estos sistemas, podemos adaptarlos para un mejor desempeño y ayuda a la evolución de las mismas tecnologías que persiguen una vía más cómoda y segura.



3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Los objetivos de esta investigación son:

Desarrollar una aproximación experimental de la capacidad técnica de los elementos que componen la infraestructura de la vía actual para aceptar los sistemas de conducción semiautónomos, en particular:

1. Observar las velocidades que pueden mantener los vehículos semiautónomos sin la intervención del conductor en función de las características de la infraestructura de la vía.
2. Observar el funcionamiento de los vehículos semiautónomos sin la intervención del conductor a lo largo de carreteras con distintas configuraciones de marcas viales.
3. Observar el funcionamiento de los vehículos semiautónomos sin la intervención del conductor en presencia de acuerdos convexos.
4. Proponer las mejoras que serían necesarias en la infraestructura viaria para que los sistemas semiautónomos de conducción mantengan un funcionamiento óptimo y más fiable.

Las hipótesis que vamos a suponer para el desarrollo de estos objetivos son:

- Existe una correlación entre la geometría de la vía y la velocidad máxima a la que puede circular un vehículo controlado por un sistema semiautónomo de conducción.
- Existe una correlación entre la continuidad de las marcas viales de guiado y la disminución de las cesiones de control al conductor por parte de un sistema semiautónomo de conducción.
- Existe una limitación entre la distancia de visibilidad en acuerdos convexos y los vehículos autónomos de conducción automatizada.

4. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para la investigación de este trabajo de fin de master ha consistido en la conducción de un vehículo con sistema semiautónomo de conducción (entre el nivel 2 y 3 de la SAE International, 2014). Las pruebas de conducción se han realizado con un único conductor, y a lo largo de carreteras de diversas tipologías, con el fin de verificar las hipótesis planteadas en esta investigación.

Para la verificación de la primera hipótesis se registraron en varios recorridos diversas curvas horizontales las velocidades y si el sistema de conducción mantiene el control o se produce una cesión de control al conductor. En cada recorrido con una velocidad distinta y, mayor o menor según fuera el caso, pasa así registrar las velocidades del sistema en cada curva.

Para la verificación de la segunda hipótesis se realizaron varios recorridos a lo largo de autovías, con el fin de registrar en diferentes configuraciones de marcas viales de borde de carril si el sistema mantiene o cede el control al conductor en cada caso particular.

Para la verificación de la tercera hipótesis se realizaron varios recorridos a lo largo de carreteras que contaran con curvas con acuerdo, para registrar si el sistema de conducción semiautónoma mantenía o cedía el control al conductor.

El coche semiautónomo utilizado durante el desarrollo de las pruebas es un BMW 520d de 2017, equipado con el paquete “Driving Assistant Plus”, que le atribuye un nivel de automatización 2 (o 3 dentro del dominio operacional de un mismo carril) a través del asistente de “control de crucero activo (ACC)” y el “asistente activo para el mantenimiento del carril (LKA)”. Una vez son activados estos sistemas, habiendo seleccionado previamente la velocidad de crucero a la que se quiere realizar el ensayo, el coche toma el control de los sistemas de aceleración, frenado y dirección, teniendo la capacidad de circular sin ayuda del conductor en un mismo carril debido a la detección de las marcas viales de borde mediante dos cámaras de video situadas en la parte trasera del espejo retrovisor interior (ver Figura 82). El vehículo también cuenta con la capacidad de detección de señales de tránsito, asistente de evasión frente a choque, prevención de colisión, entre otros.



Figura 81. Indicadores de que el sistema de seguimiento está activo. Fte. BMW



Figura 82. Ubicación de cámaras de retrovisor interior. Fte. BMW

El conductor durante todos los recorridos debe estar supervisando el comportamiento del sistema de manera activa y para esto se le requiere que este en contacto con el volante, sin necesidad de apretar o ejercer fuerza sobre él. Durante unos segundos puede estar sin las manos en el volante, aunque el sistema transcurrido un tiempo determinado le avisa al conductor que debe poner las manos sobre el volante (ver Figura 83). Si el sistema de conducción semiautónoma está en capacidad de percibir el carril de circulación y los vehículos u objetos situados delante del mismo, con el uso de los diferentes sensores integrados, de procesar la información del entorno y actuar sobre los diferentes sistemas de mando del vehículo, el sistema seguirá en control activo del vehículo. En caso que en alguna parte del procesamiento de información se produce un fallo, alguna inconsistencia o confusión, el sistema cede el control de todos los sistemas inmediatamente al conductor, sin aviso acústico previo, pero dejando de accionar el volante.



Figura 83. Aviso al conductor de poner manos sobre volante. Fte. BMW

Para el registro de las variables de la investigación se utilizó una cámara de video Garmin Virb Elite, que graba videos en HD y dispone de GPS para almacenar la información del recorrido. La cámara se colocó en un soporte junto a la cabeza del conductor para que pudiese grabar el tacómetro, la carretera, el mapa presentado en la pantalla del navegador, el tablero de instrumentos, la posición de las manos en el volante, grabación de voz del conductor para dar a conocer los momentos de desconexión, y el acompañante (ver Figura 85).



Figura 84. Cámara Garmin Virb Elite y soporte utilizados. Fte. Elaboración personal



Figura 85. a) Ubicación de la cámara de video. b) Campo visual captado por la cámara. Fte. Elaboración personal

Se analizaron para esta investigación más de 2,000 km de diversas autovías, carreteras multicarril y carretera convencional, observando 184 curvas, incluyendo ambos sentidos de circulación como curvas distintas (ver Figura 87 y Figura 86), también se observaron 44 salidas y 41 entradas, entre ambos sentidos (ver Figura 88, Figura 89, Figura 90 y Figura 91), y también se observaron 11 tramos en los que se hallaron 24 acuerdos convexos (ver Figura 92, Figura 93, Figura 94, Figura 96 y Figura 95). Se realizaron observaciones de las localizaciones en donde el vehículo semiautónomo cedía el control al conductor y que factores (perdida de guiado por marca vial de borde, geometría de la vía, etc.) eran los responsables de esta cesión.

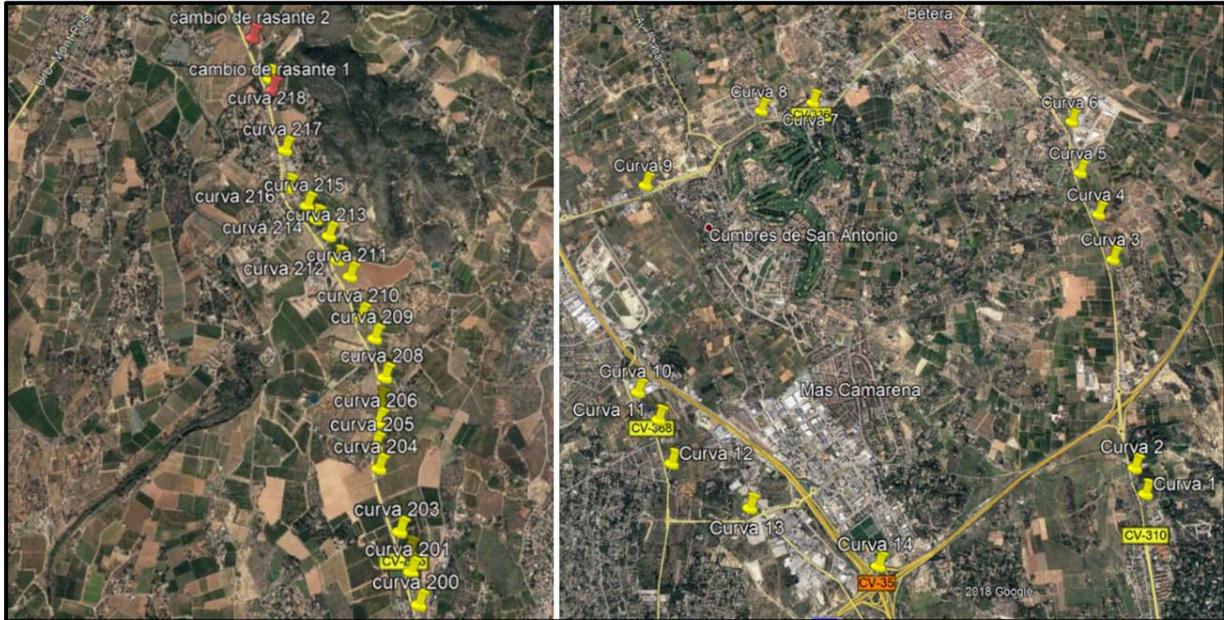


Figura 86. Localización de las curvas analizadas (1). Fte. Google Earth



Figura 87. Localización de las curvas analizadas (2). Fte. Google Earth



Figura 88. Localización de entradas observadas. Fte. Google Earth

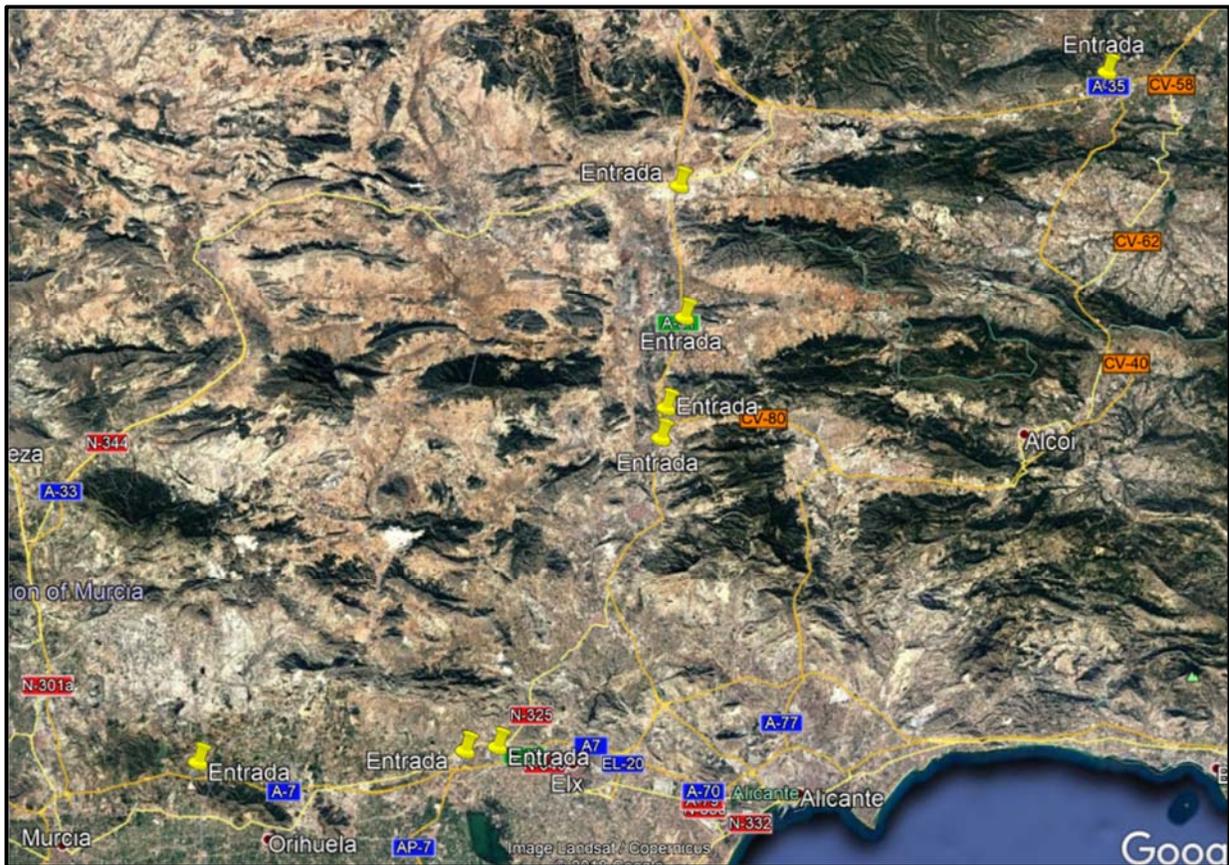


Figura 89. Localización de entradas observadas (2). Fte. Google Earth.

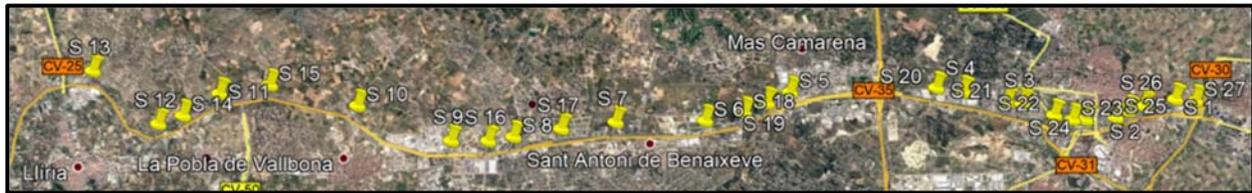


Figura 90. Localización de salidas observadas (1). Fte. Google Earth

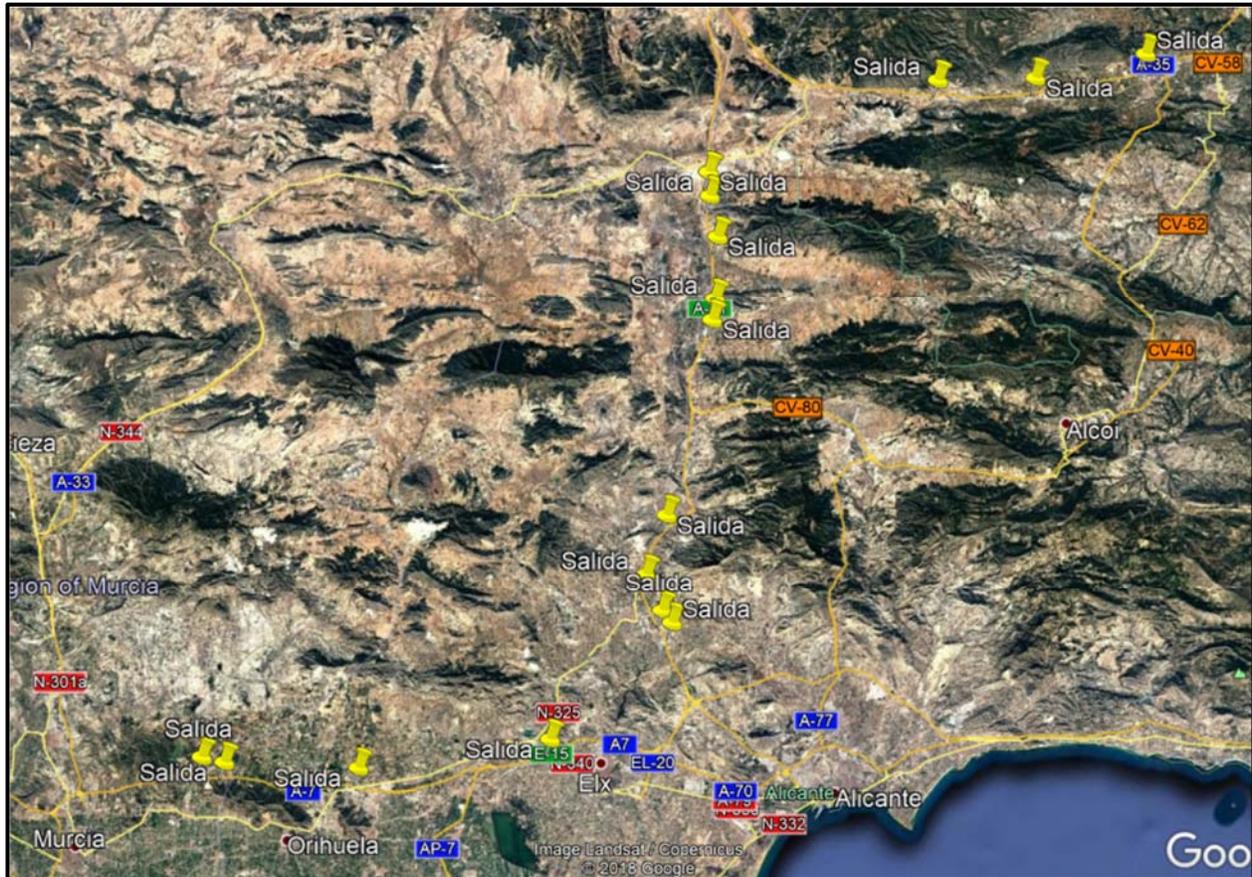


Figura 91. Localización de salidas observadas (2). Fte. Google Earth



Figura 92. Localización de los tramos con acuerdos convexos observados. Fte. Google Earth



Figura 93. Localización de los tramos con acuerdos convexos observados. Fte. Google Earth



Figura 94. Localización de los tramos con acuerdos convexos observados. Fte. Google Earth



Figura 95. Localización de los tramos con acuerdos convexos observados. Fte. Google Earth



Figura 96. Localización de los tramos con acuerdos convexos observados. Fte. Google Earth

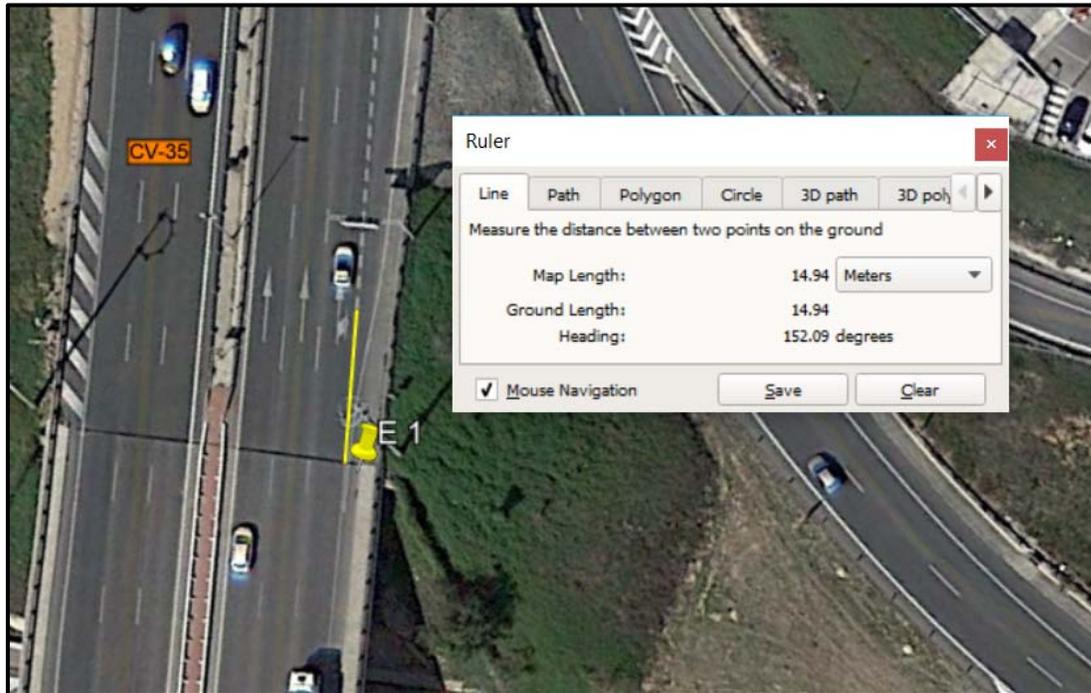


Figura 97. Método de medición de entradas y salidas utilizado. Fte. Google Earth

Se analizó la geometría de las marcas viales correspondientes mediante mediciones sobre imágenes de Google Earth (ver Figura 97). Así mismo, para la determinación de la geometría de las curvas (curvas circulares, curvas de transición, etc.) se restituyó empleando una metodología basada en el azimut, y no directamente en la curvatura. La metodología de restitución utilizada fue la desarrollada por el GIIC, que es altamente precisa en comparación a las alternativas consultadas, esta tiene como punto de partida la creación de una polilínea con puntos entre 10 – 20 metros, recreando con esta el eje de la vía en cuestión. A partir de la polilínea creada es posible extraer una representación gráfica del azimut en cada punto del eje de la vía. Con lo obtenido anteriormente y, empleando ecuaciones de elementos individuales y la relación de continuidad, se logra ajustar un estado de alineaciones de forma altamente precisa. El ajuste se realiza en dos fases: la primera es mediante un proceso heurístico, y la segunda es mediante algoritmos genéticos.

En el anexo I, se muestran los resultados obtenidos de la restitución de la geometría de las curvas observadas. así mismo, en el anexo II se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de las entradas y las salidas observadas. En el anexo III, se encuentra la geometría de los acuerdos convexos observados.

Variables del proceso

En la investigación se analizaron las variables para cada curva y recorrido de las mismas, y cada salida y entrada que limitara el vehículo de conducción semiautónoma en su funcionamiento. Estas variables han sido:

- En el caso de las curvas y sus recorridos:
 - Carretera (Nombre, Tipo de vía).
 - Punto Kilométrico (P.K.).
 - Radio (m).
 - Ángulo de deflexión (g).
 - CCR (g/km).
 - Sentido de giro.
 - Desarrollo (m).
 - Sentido de circulación (Ida/Vuelta).
 - Marcas viales de borde de carril (continuas/discontinuas).
 - Carril de circulación (1, 2, 3...).
 - Perfil longitudinal (Rasante, Acuerdo Cóncavo/Convexo).
 - Velocidad de diseño (km/h).
 - Límite de velocidad (km/h).
 - Velocidad de operación estimada (km/h).
 - Seguimiento de vehículo delante (Si/No).
 - Velocidad observada (km/h).
 - Cesión del control al conductor (Si/No).

- En el caso de Acuerdos verticales:
 - Carretera (Nombre, Tipo de vía)
 - Punto Kilométrico.
 - Rasante
 - Acuerdo (cóncavo/convexo)
 - Velocidad de diseño (km/h)
 - Velocidad de proyecto (km/h)
 - Velocidad observada (km/h)
 - Cesión de control al conductor (Si/No)
 - Distancia de visibilidad de parada (m)
 - Longitud curva de acuerdo (m)
 - Altura del objeto según la norma 3.1 IC (m)
 - Altura de las marcas viales (m)
 - Altura del conductor según la norma 3.1 IC (m)
 - Altura del conductor real (m)
 - Altura del radar (m)
 - Altura de la cámara en el espejo retrovisor (m)
 - Pendiente (%)



- Tiempo de percepción y reacción (segundos)

- En el caso de las entradas/Salidas que limitaron el funcionamiento del sistema semiautónomo de conducción.
 - Carretera (Nombre, Tipo de vía)
 - Punto Kilométrico (P.K.).
 - Conexión (Entrada/Salida)
 - Longitud sin marca vial junto al inicio o final del carril de Entrada/Salida (metros).
 - Ancho del carril en el inicio de la marca vial discontinua de carril de cambio de velocidad (metros).
 - Perfil longitudinal (Rasante, Acuerdo cóncavo/convexo).
 - Cotangente de la cuña.
 - Elemento geométrico en planta (curva izquierda, curva derecha, recta).
 - Cesión del control al conductor (Si/No).

5. RESULTADOS

Partiendo de las observaciones realizadas, en cada curva por sentido de circulación, las velocidades de recorrido, el control del sistema ante estas, se pudo registrar la velocidad máxima de recorrido a la cual el sistema semiautónomo de conducción se queda en control de los controles del vehículo, Dejando dicho esto que para velocidades mayores a las mostradas el sistema cede el control del vehículo al conductor (ver Figura 100 y Figura 101).

Así mismo, a partir de las observaciones realizadas a las salidas y entradas con carril de cambio de velocidad, se obtuvo que 26 de las salidas, y 17 de las entradas provocaron una cesión del control del sistema semiautónomo de conducción. De una muestra de 44 salidas y 41 entradas, entre ambos sentidos de circulación, el sistema cedió el control en un 59% y 41%, respectivamente (ver Figura 99). Se pudo observar que, en el caso de las salidas, las mismas representan una limitante mayor para el sistema de conducción. En el anexo II, se pueden consultar los valores resultantes obtenidos de las salidas y entradas observadas.

Se ha observado que el sistema de conducción semiautónoma a lo largo de los más de 2,000 km recorridos, ha presentado algunas sesiones de control representadas en este trabajo como datos anómalos. Estos datos han sido:

- Desconexiones en tramos rectos o curvos al pasar por salidas/entradas en las que no se contaba con marca vial de borde.
- Desconexiones en las confluencias de carriles en el espacio que no se contaba con marca vial clara de borde de carril, creando una duda en el sistema de seguimiento de marcas viales.
- Desconexiones en tramos en los que se observaba un deterioro de la vía, y por consiguiente de las marcas viales.
- Desconexiones en tramos en los que hay acuerdos verticales cóncavos/convexos. Se provoca una pérdida de trazado para el sistema, y el mismo ante la duda en el seguimiento cede el control del sistema al conductor.
- Desconexiones en curvas de radio reducido (menores que 150 m). Puede deberse a una posible limitación tecnológica del sistema semiautónomo.

De estos datos anómalos, cabe destacar que los relacionados con las marcas viales de borde de carril en entradas y salidas, son por las exigencias estipuladas en la norma 8.2 IC (Ministerio de Fomento, 1987) en las que se establece que para carriles de entrada y salida se inicie o se concluya donde la anchura del carril sea igual a 1.5 m. Provocando esto, una longitud de vano sin marca vial de borde en la calzada principal, cuya magnitud dependerá de la cotangente de la cuña correspondiente, hasta que se alcancen los 1.5 m de anchura del carril adicional como se observa en la Figura 98.



Figura 98. . Vano en las marcas viales de entradas y salidas exigidos por la norma. Fte. Norma 8.2 IC: Marcas viales

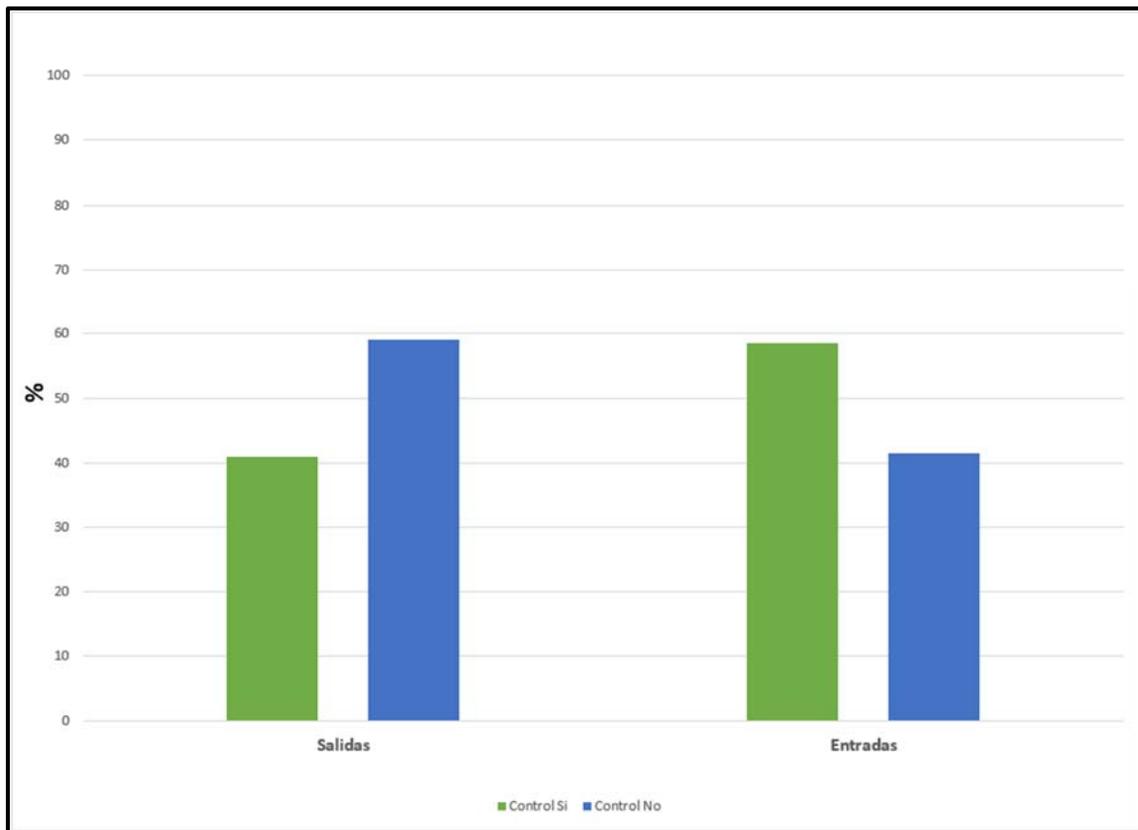


Figura 99. Resultados de las observaciones de control de la conducción semiautónoma en las marcas viales de entradas y salidas.

Igualmente, destacar que la mayoría de las pérdidas y aumentos de carriles producían que el sistema de conducción semiautónomo cediera el control al conductor, así mismo en las convergencias y divergencias. La explicación a lo anterior está en la forma en la que están las marcas viales longitudinales en estas localizaciones, siguiendo la norma y dejando el vano exigido.

En la Figura 100 se puede observar la reciprocidad entre el radio de las curvas observadas y la velocidad máxima alcanzada para dicha curva. Así mismo, se pueden observar los datos anómalos (representados por una x) observados en las curvas. Destacar que, los valores anómalos que están totalmente en el eje horizontal son aquellos en los que no se pudo alcanzar ninguna velocidad de recorrido segura para que el sistema semiautónomo lograra controlar el vehículo sin ceder el control al conductor. Se consideraron valores anómalos también aquellas velocidades que en un sentido y otro de la misma curva alcanzaran velocidades sensiblemente menores y, que para curvas con radios similares se alcanzara un valor máximo de velocidad menores a las obtenidas.

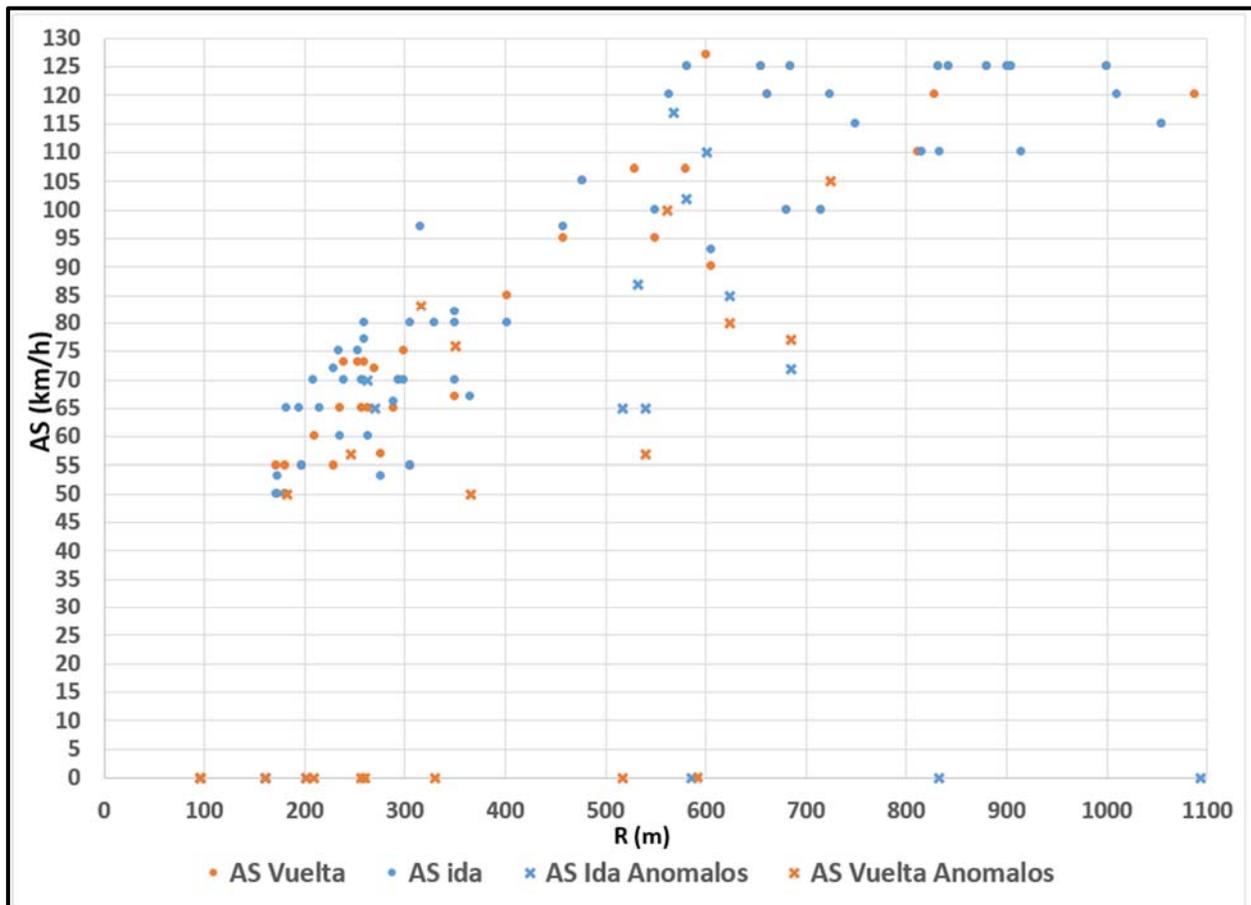


Figura 100. Velocidad máxima alcanzada con conducción semiautónoma en función al radio de las curvas.

En la Figura 101 se ha representado igualmente la velocidad máxima de recorrido observada para cada curva en cada sentido de circulación, en función de la tasa de cambio de curvatura (CCR). Entre las observaciones de igual forma se encuentran valores anómalos (representados con una x) se consideraron de igual forma que los anteriores. Las velocidades máximas alcanzadas por el sistema semiautónomo de conducción en curvas no superaron los 120 km/h, aunque en tramos rectos con un entorno favorable el sistema si lograba controlar el vehículo sin ceder el control al conductor.

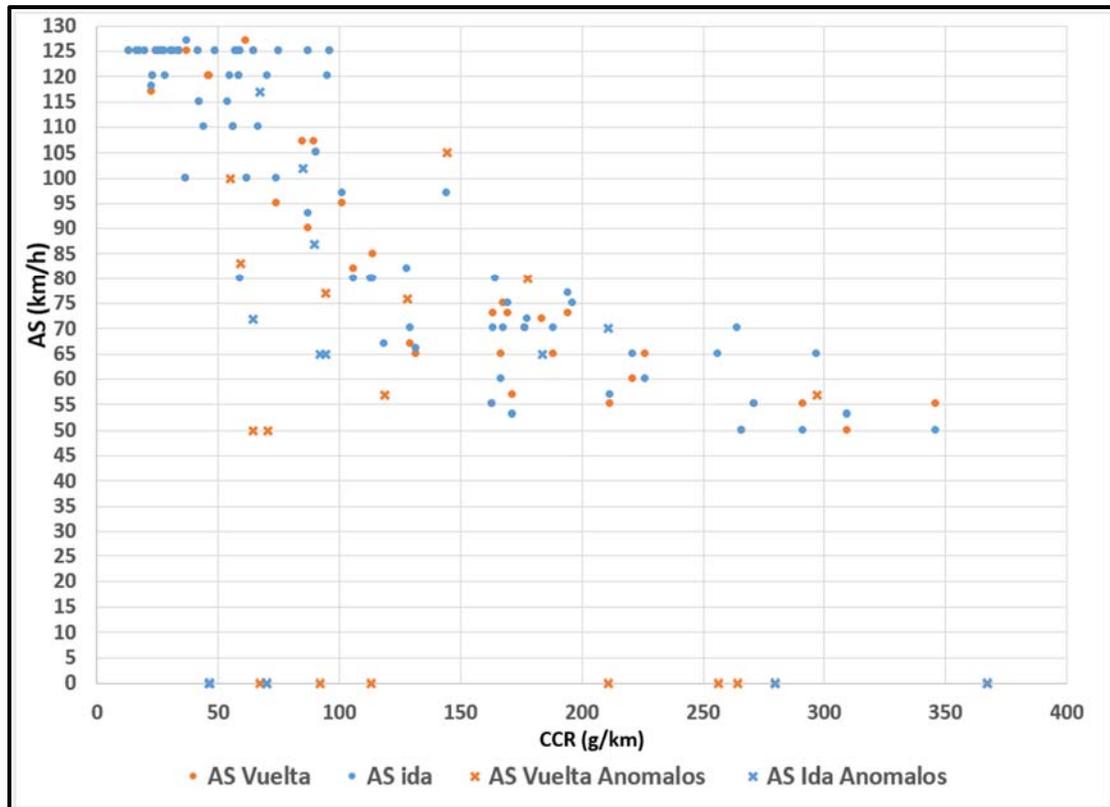


Figura 101. Velocidad máxima alcanzada con conducción semiautónoma en función al CCR de las curvas

En el anexo I, se pueden consultar los valores resultantes obtenidos para las curvas observadas.

Partiendo de las observaciones realizadas en los tramos con acuerdos verticales convexos, se analizó la geometría de los mismos, y la distancia de visibilidad de parada real. La norma de trazados 3.1 IC, dice que la altura del conductor y de objeto para medir la distancia de visibilidad de parada es 1.10 metros la altura del conductor, y no mayor de 0.50 metros la altura del objeto.

En la Figura 102 se ha representado la distancia de visibilidad real disponible en función del parámetro de la parábola del acuerdo convexo (K_v) para los diferentes escenarios observados. Los escenarios observados fueron la distancia de visibilidad de parada según la norma (Altura del punto de vista del conductor 1.10 metros) representado en color rojo, según el punto de vista del conductor real (altura de punto de vista 1.18 metros) representada en color azul, del punto de vista de las cámaras de guiado (altura de punto de vista de cámaras 1.38 metros) representada en color amarillo, según punto de vista del radar (altura del punto de vista del radar 0.36 metros) representada en color verde, algunos de estos (punto de vista de cámaras, punto de vista del

conductor real) analizados a diferentes alturas de objeto (0.50 y 0 metros) representados en morado y amarillo. Los resultados se representaron en un nomograma en el cual se relaciona la distancia de visibilidad en función de la geometría del acuerdo del lado derecho, y del lado izquierdo del nomograma en función de la velocidad de proyecto.

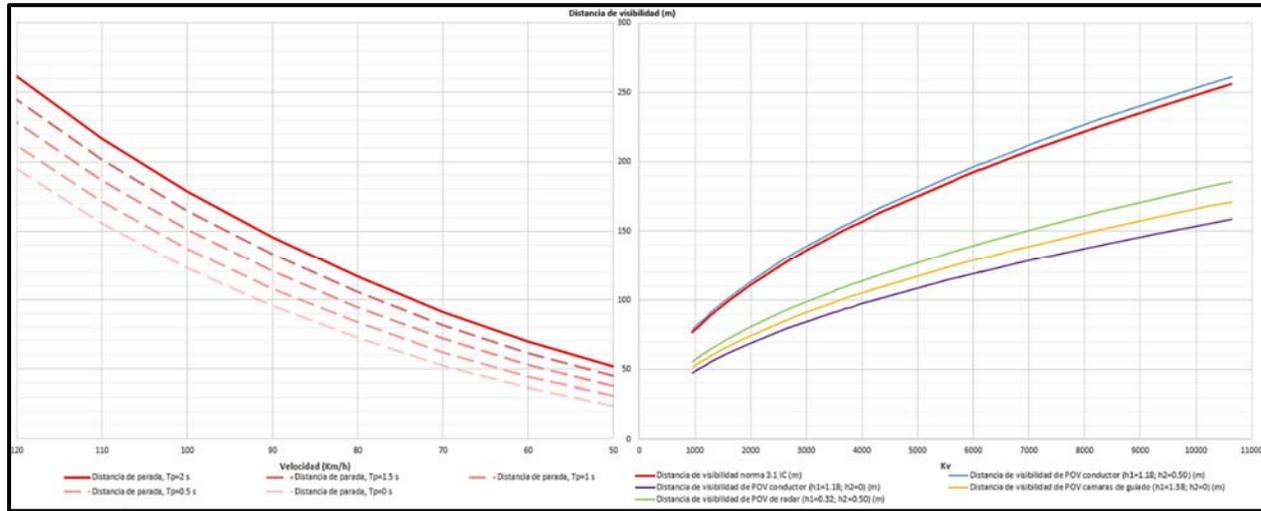


Figura 102. Nomograma de los resultados obtenidos de las distancias de visibilidad en función del Kv y la velocidad de proyecto.

En el lado izquierdo de la Figura 102 se representaron las distancias de visibilidad disponible para distintas velocidades variando el tiempo de percepción y reacción. En la figura se presentan los parámetros de la norma con una línea roja continua, y la variación de los tiempos de percepción y reacción en líneas discontinuas de color rojo degradado.

6. ANALISIS

6.1. Comportamiento del vehículo semiautónomo ante curvas.

Inicialmente para descartar los valores anómalos obtenidos en las observaciones, se eliminaron las que el sistema de conducción semiautónoma no logro controlar con ninguna velocidad. También, las que permitieron el control, pero, a una velocidad mucho menor en un sentido que en otro, y, las que la diferencia de velocidades era mayor a ± 5 km/h un sentido con respecto al otro.

Luego de descartar los valores anómalos nos queda una muestra final resultante incluyendo ambos sentidos de circulación como curvas distintas de 132 curvas. Cabe destacar que dentro de las observaciones no se pudieron registrar con el sistema controlando velocidades menores que 50 km/h, y radios menores que 170 m.

De estas observaciones, podemos decir que existe una correlación entre la geometría de las curvas observadas y la velocidad máxima con la que el sistema de conducción semiautónoma pudo mantener el control del vehículo. Dicho lo anterior, se puede decir que existe un concepto nuevo de velocidad para las carreteras relacionado con la geometría de cada elemento. Este nuevo concepto se llama Velocidad segura para la conducción automatizada que es la velocidad máxima asociada a cada elemento de la vía que permite que el sistema de conducción automatizada mantenga el control. Una forma abreviada de este nuevo concepto seria **Velocidad automatizada (AS)**. En las Figura 103 y Figura 104 se puede observar cómo se compara esta velocidad con el Radio y el CCR.

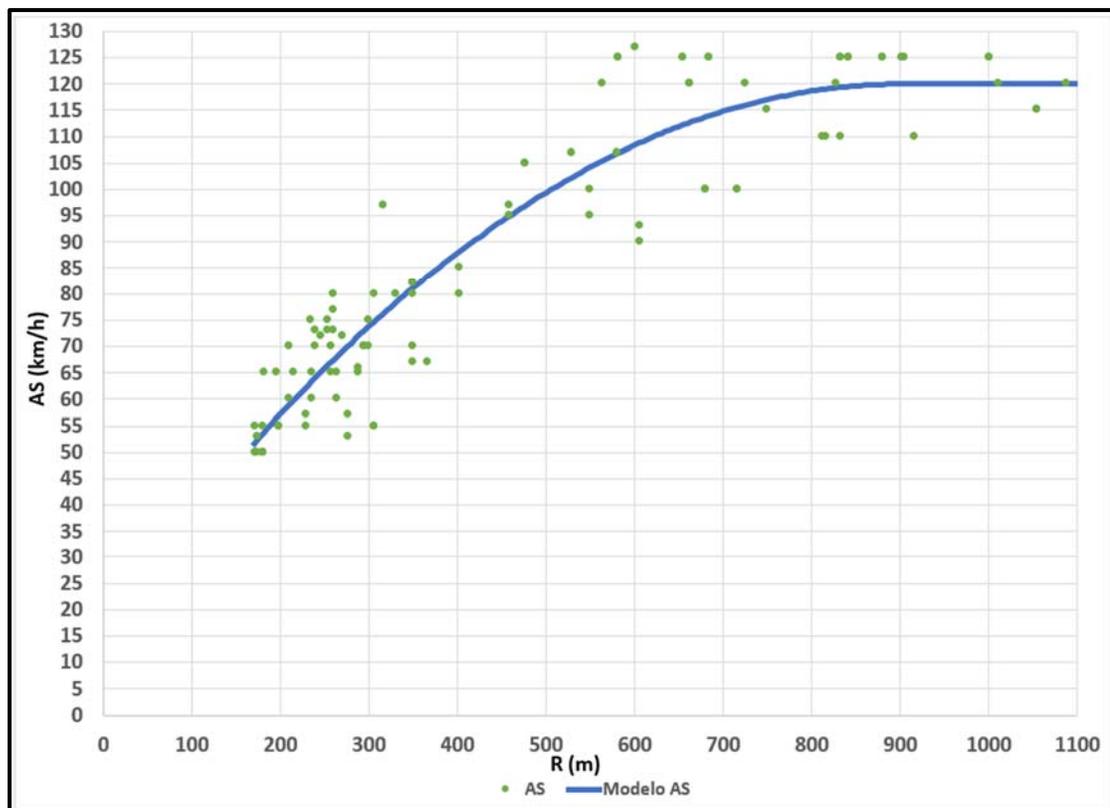


Figura 103. Velocidad automatizada (AS) en función al radio de las curvas observadas.

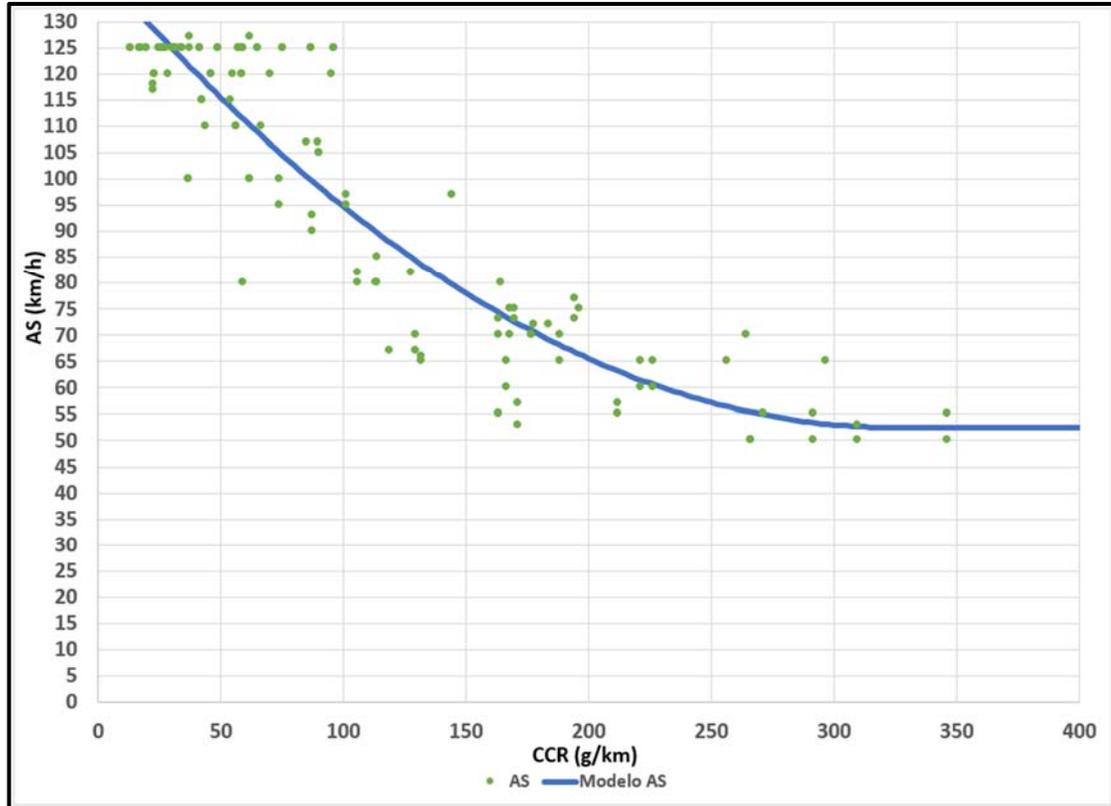


Figura 104. Velocidad automatizada (AS) en función del CCR de las curvas observadas.

En las Figura 103 y Figura 104 se utilizaron modelos que permiten estimar la velocidad automatizada en función al radio de la curva y, al CCR en cuestión. El primero se trata de un modelo calibrado por partes, con un ajuste global $R^2 = 84.42\%$ con un inicio parabolico siguiendo esto una asíntota de forma horizontal a partir de un radio entre los 900 m. y el segundo modelo presenta la ventaja que en el CCR estén incluidas las clotoides. Este segundo modelo de igual forma esta calibrado por partes, con una parte en forma de parábola seguida de una asíntota. El grado de ajuste para este segundo modelo es de $R^2 = 85.01\%$. Los modelos Utilizados son los siguientes:

$$AS = \begin{cases} 16.36 + 0.2299 \cdot R - 0.0001274 \cdot R^2 & \text{si } R \leq 901.7 \text{ m} \\ 120 & \text{si } R > 901.7 \text{ m} \end{cases}$$

Donde AS es la velocidad automatizada expresada en km/h, y R el radio de la curva expresado en m.

$$AS = \begin{cases} 140.45 - 0.541 \cdot CCR + 0.000831 \cdot CCR^2 & \text{si } CCR \leq 325.3 \text{ gon/km} \\ 52.5 & \text{si } CCR > 325.3 \text{ gon/km} \end{cases}$$

Donde AS es la velocidad automatizada expresada en km/h, y el CCR es la tasa de cambio de curvatura expresada en gon/km.

A partir de las observaciones realizadas vemos que las mismas indican que en casos de autovía las velocidades alcanzadas por el sistema autónomo de conducción suelen igualar o

pasar en gran parte de los casos la velocidad reglamentaria establecida para ese tramo. Sin embargo, para los casos de carreteras convencionales las velocidades reglamentarias no suelen alcanzarse, generalmente suelen ser menores las velocidades del sistema de conducción automatizada.

6.2. Comportamiento del vehículo semiautónomo ante acuerdos convexos.

Luego de las observaciones de los tramos con acuerdos convexos, se analizó la geometría de los mismos obteniendo así parámetros de parábola entre 955.61 y 10631.53, así mismo longitudes de acuerdo entre 50 y 300 metros. Las distancias de visibilidad obtenidas para estos acuerdos entre valores de 70 y 300 metros, valores que luego se contrastaron con las visibilidades disponibles de radar, conductor real y cámaras de guiado. En el anexo III se pueden consultar los valores resultantes de estas observaciones.

En la Figura 102 se representa el resultado de estas observaciones, el mismo siendo un nomograma con las variables observadas. Este nomograma da como resultado la distancia de visibilidad disponible del radar con respecto a la de la norma 3.1 IC de trazados. El funcionamiento del mismo consta que para un Kv determinado existe una distancia de visibilidad según la norma 3.1 IC representada en la línea roja, esta distancia de visibilidad se relaciona a la velocidad de proyecto con la que la misma se logra obtener en condiciones de la norma. Partiendo de estos valores se analiza la misma velocidad esta vez con un tiempo de percepción y reacción igual a cero asumiendo que el radar responde de manera instantánea, esto da como resultado una distancia de visibilidad menor que luego se compara con la distancia de visibilidad del radar, la diferencia entre estas visibilidades da como resultado la distancia de visibilidad disponible del radar, y en que rangos de tiempo este tiene visibilidad disponible, tal como se explica en la Figura 105.

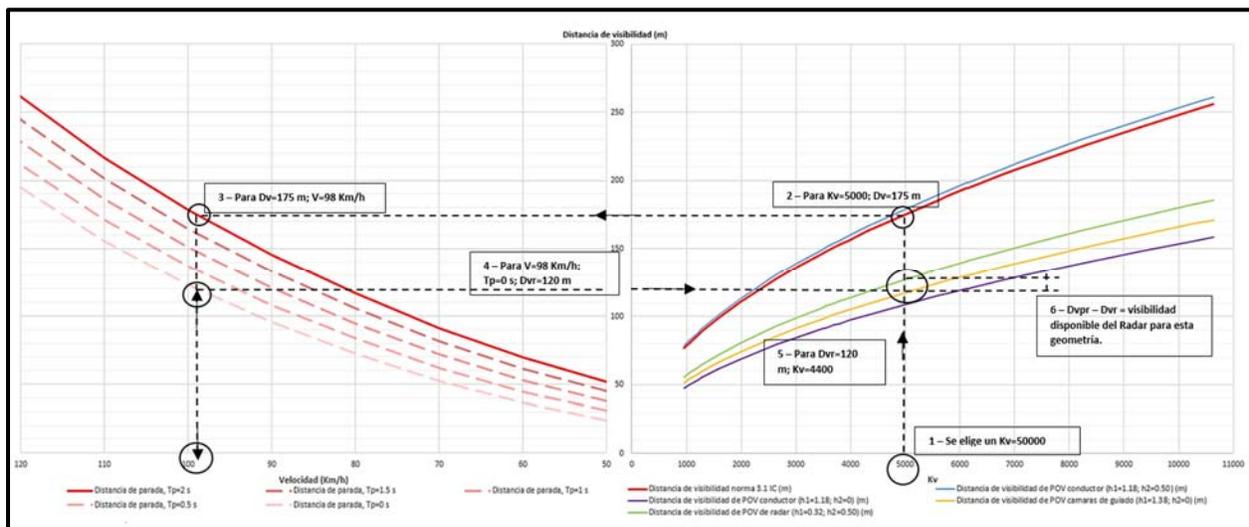


Figura 105. Funcionamiento del nomograma resultante del análisis de distancias de visibilidad.

6.3. Comportamiento del vehículo semiautónomo ante entradas y salidas.

Durante las observaciones de las salidas y entradas, se realizó un análisis de las longitudes del vano sin marca vial y si coincidían en su ubicación en tramos rectos, tramos de curva a derecha o izquierda. Las observaciones registradas de cesión de control de los carriles de cambio de velocidad (salida o incorporación) mencionadas anteriormente fueron de 26 y 17 respectivamente.

Las observaciones arrojaron resultados que luego de representar un valor medio y la desviación estándar de la longitud de vano sin marca vial confirma que el hueco sin marca vial en salidas presenta una mayor probabilidad de ceder el control al conductor en comparación a los valores obtenidos para las entradas (ver Figura 106). La longitud media de vano sin marca vial obtenida ha sido de 38.80 metros en salidas y 43.60 metros en entradas. En las observaciones realizadas se pudo registrar que la longitud menor de vano sin marca vial es de 15 metros en salidas y 19.50 metros en entradas. Queda en evidencia que sin importar la longitud del vano sin marca vial el sistema automatizado cede el control. En el anexo II, se pueden consultar las longitudes medidas de las salidas y entradas observadas.

De igual forma se ha representado en la Figura 107 la longitud de vano sin marca vial en la que el sistema cedió el control al conductor en función del elemento geométrico en el que está ubicada la misma salida o entrada, es decir, si la misma está localizada en recta, curva a izquierda o derecha. En esta figura queda nuevamente confirmado que las salidas tienen mayor impacto para el sistema provocando desconexiones y, en el caso de este estudio se observa como el sistema cede más el control en salidas ubicadas en curvas a izquierdas.

Ante este análisis podemos afirmar que existe una clara correlación entre esta longitud de vano sin marca vial de guiado y el aumento de las desconexiones del sistema autónomo de conducción.

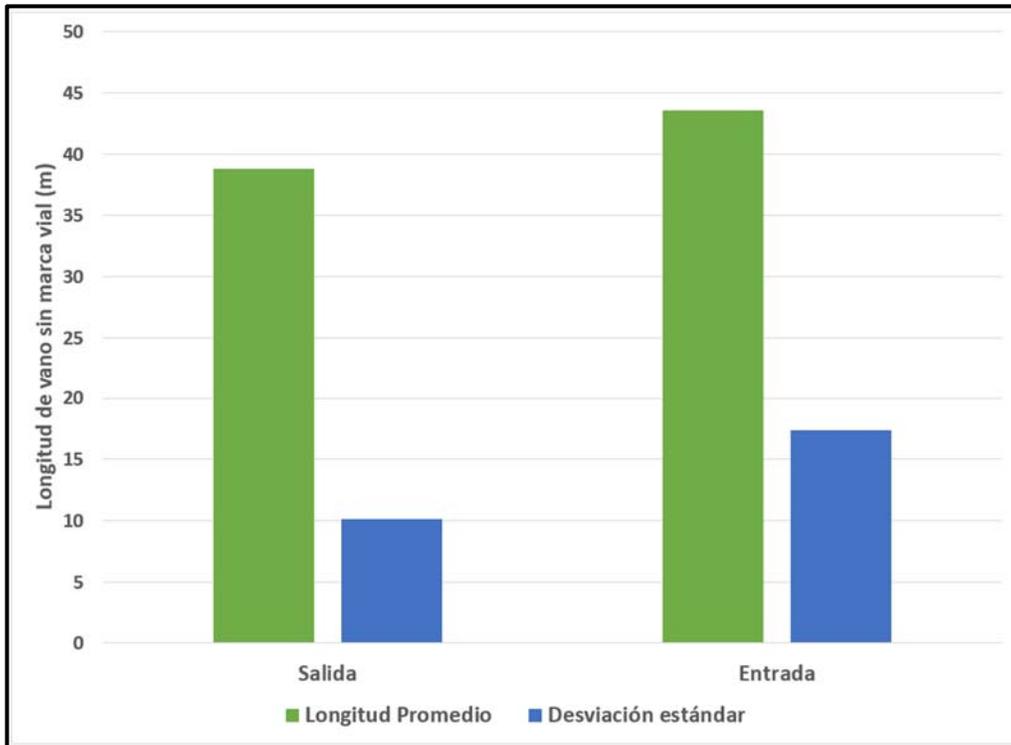


Figura 106. Longitud Promedio y desviación estándar de la longitud de vano sin marca vial que cede el control en salidas y entradas

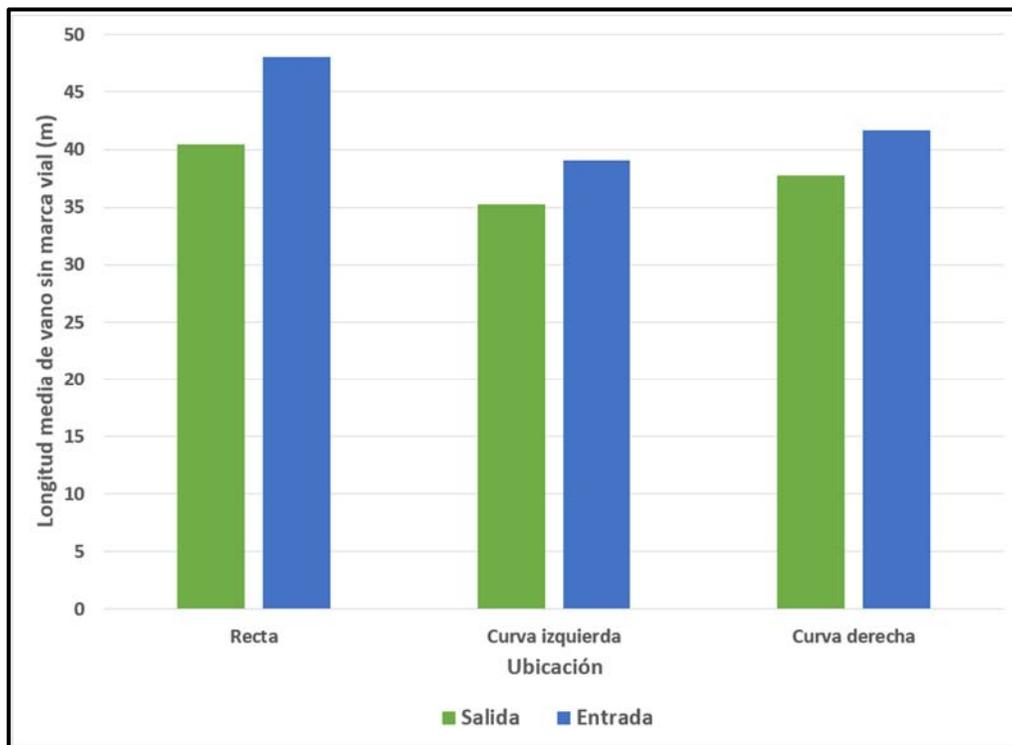


Figura 107. Longitud media del vano sin marca vial en la que el sistema autónomo cede el control en salidas y entradas en función del elemento geométrico de la vía.

Luego de analizar las observaciones realizadas, se puede decir que las mismas indican que estos vanos sin marcas viales sin importar que tan corto o largo sea, deben ser eliminados si se quiere que los sistemas de conducción autónoma funcionen correctamente, debido a que estos vanos sin marca vial suponen una limitante para el funcionamiento del sistema.

Luego de ver en las figuras 70, 71, 72 y 73, como en otros países esta longitud de vano sin marca vial no existe, debido a que en su norma el mismo hueco debe cerrarse, en otros países el mismo hueco es opcional, pero luego de ver los resultados de esta investigación vemos que se debe eliminar ese vano sin marca vial.

7. DISCUSIÓN

7.1. Comportamiento del vehículo semiautónomo ante curvas.

Tal como se pudo observar en los análisis del comportamiento del sistema semiautónomo ante curvas, existe una correlación entre la velocidad automatizada y la geometría de las curvas. A partir de esto, se va haciendo más que necesario hacer una comparación entre la velocidad automatizada con los conceptos habituales conocidos de velocidad asociados a curvas, es decir hacer una comparación con la velocidad de diseño, de operación y los límites de velocidad establecidos.

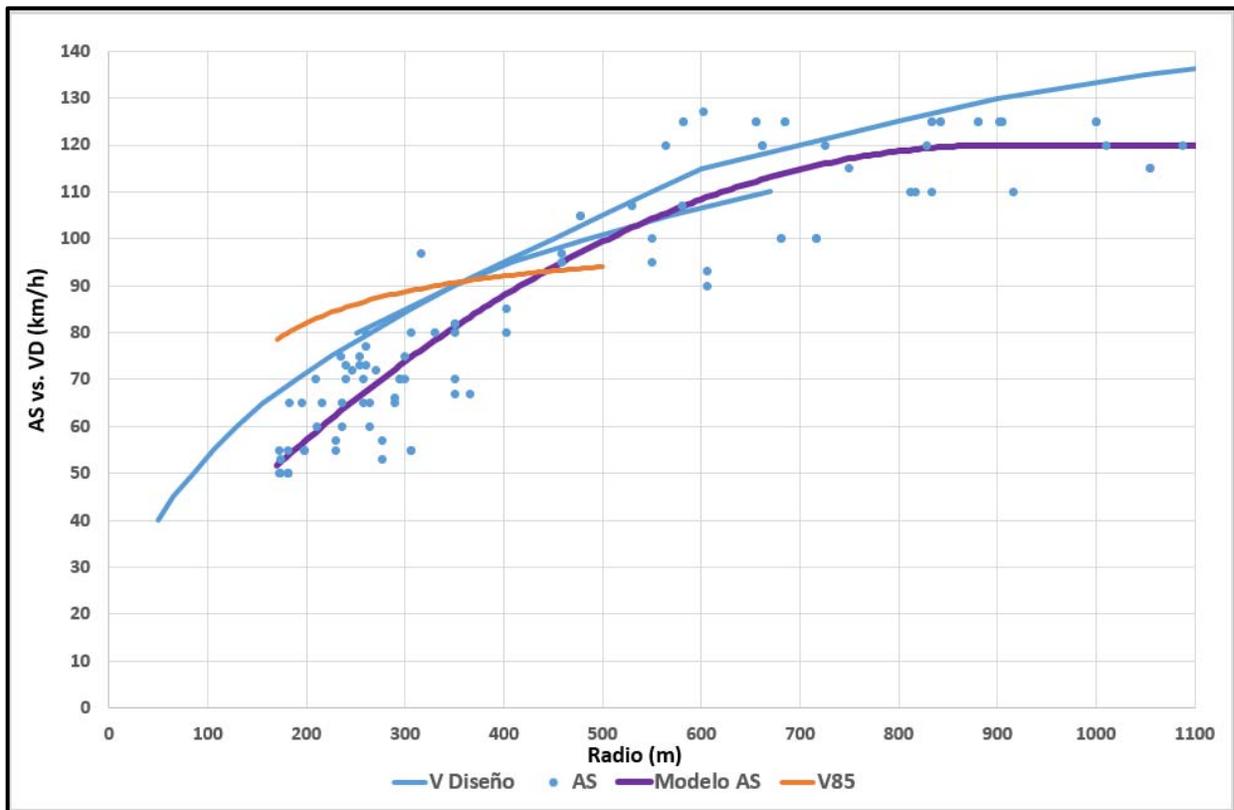


Figura 108. Confrontación de la velocidad automatizada (AS) con la velocidad de operación (V85) y la de diseño en función del radio de la curva.

En la Figura 108 se puede observar como las velocidades del sistema semiautónomo de conducción son inferiores a las velocidades de operación y diseño, salvo en algunos casos aislados en los que la tasa de cambio de curvatura correspondientes eran bajos. En el modelo utilizado las velocidades automatizadas de conducción se quedan por debajo de las velocidades de diseño con una media de 10 km/h, y en comparación con las velocidades de operación se puede observar un valor aún mayor.

Teniendo en cuenta la disimilitud de las velocidades automatizadas con respecto a las velocidades de diseño y operación segura de una carretera, surge la necesidad de un nuevo concepto de consistencia. Este concepto debe salirse de lo conocido tradicionalmente como consistencia y contemplar la conducción automatizada dentro de su definición. En cara a esta necesidad de un nuevo concepto de consistencia se propone el concepto de la **Consistencia de la conducción automatizada** el mismo toma en consideración las diferencias entre las expectativas de los conductores, basadas en la velocidad que ellos creen que se puede desarrollar y su seguridad con el sistema de conducción autónoma, y la velocidad automatizada que realmente se puede desarrollar en esa curva.

Este concepto de consistencia de la conducción automatizada cada día va tomando más fuerza y sentido, debido a que los vehículos autonomos ya están circulando en las carreteras y los conductores cada día van usando más estos sistemas. Cabe destacar que mientras mayor sea la diferencia entre la velocidad que el conductor cree que puede circular y la velocidad a la que el sistema autónomo puede hacerlo sin ceder el control, la probabilidad de accidentes en algunas curvas será mayor.

Para mitigar este problema ligado a la seguridad vial, se va haciendo necesario crear un sistema en el que se identifique cada tramo de red viaria con su nivel de automatización correspondiente en el cual los vehículos pueden circular correctamente, para así modificar las expectativas tanto del conductor como para el sistema y, reducir la posible inconsistencia en algún tramo viario. De esta necesidad surge un nuevo concepto que ayudaría a mitigar esta problemática de seguridad, se trata del **nivel de servicio para la conducción automatizada** en cada tramo de carretera.

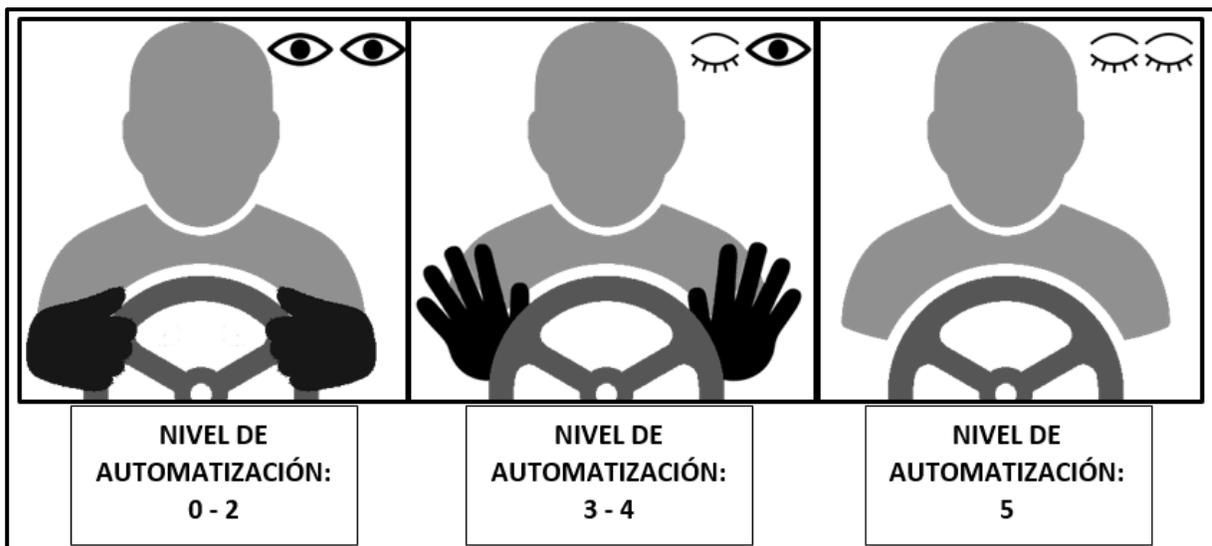


Figura 109. Propuesta de señalización para el nivel de servicio de la conducción automatizada.

El concepto de nivel de servicio deberá ser acreditado con antelación, para así hacer difusión para que los conductores conozcan esto, y los fabricantes puedan incluir el mismo en los sistemas de reconocimiento de señales. Para conceder esta acreditación se podría hacer siguiendo a que la velocidad automatizada no sea inferior a los límites de velocidad preestablecidos, y también que en estos tramos no se supere un cierto porcentaje de cesión de control.

El procedimiento a realizarse para la acreditación de esto podría ser igual al realizado como metodología en este trabajo final de master, ya que con la utilización de una cámara de video HD y GPS, se podría grabar toda la carretera, el panel de instrumentos, el navegador con la localización para corroborar, y la posición de las manos del conductor y la respuesta del volante a lo largo del tramo, y con los datos del GPS se podría corroborar la velocidad y la trayectoria.

Tomando en cuenta como van avanzando las tecnologías a lo largo del tiempo, podemos decir que el concepto de velocidad automatizada (AS) podría convertirse en un parámetro dinámico que podrá ir aumentando con el tiempo para la misma geometría, y, a la vez, servir de reto competitivo para los fabricantes de estos tipos de vehículos y también de parámetro verificable para los reguladores. Los administradores de la vía tendrán la responsabilidad de implementar medidas que puedan mejorar el funcionamiento de los sistemas automatizados, de informar a los conductores el nivel de servicio para la conducción automatizada en cada tramo de carretera mediante nuevas señales verticales (ver Figura 109).

Teniendo en consideración que otros factores de la infraestructura afectan el funcionamiento de los sistemas de conducción semiautónoma, produciendo estas cesiones de control puntuales, algunas mejoras en la infraestructura podrían aumentar el nivel de servicio de la conducción automatizada. Por consiguiente, habrá que considerar hacer actuaciones de ser necesario para mejorar la eficacia de los sistemas automatizados y, mejorar la seguridad vial.

7.2. Comportamiento del vehículo semiautónomo ante acuerdos convexos.

Uno de los aspectos importantes a la hora de diseñar carreteras es la distancia de visibilidad disponible para los usuarios de estas carreteras. La distancia de visibilidad es la distancia visible requerida por un conductor para completar una determinada maniobra. Si la distancia de visibilidad disponible es menor que los requisitos de diseño, la probabilidad de que un conductor complete con seguridad dicha maniobra disminuye. Esto incluye el tiempo de percepción y reacción requerido por el conductor y la distancia de frenado requerida para detenerse por completo.

Los fabricantes de vehículos reconocen en sus manuales de usuario que una de las limitantes del sistema de conducción autónoma son los acuerdos concavos y convexos, pero los mismos no explican el porqué del fenómeno, y menos aportan datos de visibilidad del sistema. Sabiendo esto se crea la necesidad de análisis de esta limitante para así buscarle una solución. Cabe destacar que dependiendo del fabricante la altura, y ubicación del radar (detrás de la parrilla delantera, detrás del logo, sobre la traviesa, zona de faros antiniebla.) puede variar. La altura de radar en los turismos observados rondaba entre 29 y 35 centímetros de altura, contando que el mismo radar estuviera en la parrilla inferior del parachoques delantero.

Dicho lo anterior, y luego de analizar el nomograma resultante de las observaciones de las distancias de visibilidad disponibles en los diferentes escenarios, se puede afirmar que las distancias de visibilidad requeridas para los casos correspondientes a los vehículos de conducción autónoma son menores que las requeridas para la norma 3.1 IC. En la Figura 110 se puede observar el resultado de las iteraciones realizadas en el nomograma, en la que se obtiene la diferencia entre la distancia de visibilidad de la norma y la distancia disponible del radar,

representando así la visibilidad disponible del radar para una geometría determinada en distintos tiempos de percepción y reacción.

En la figura anterior se representan las distancias de visibilidad disponibles del vehículo autónomo, las líneas van ordenadas en función del tiempo de percepción y reacción (0, 0.5, 1, 1.5, 2 segundos) siendo la representación de la norma la de más abajo, y el caso más favorable de 0 segundos la primera línea de arriba.

Partiendo de los resultados obtenidos, y analizando los mismos, se obtuvo la visibilidad disponible del radar y en que rango de tiempo de percepción y reacción el mismo aun cuenta con visibilidad disponible. En la Figura 111 se puede observar que incluso con tiempos de percepción y reacción de 0.7 segundos se tiene visibilidad disponible.

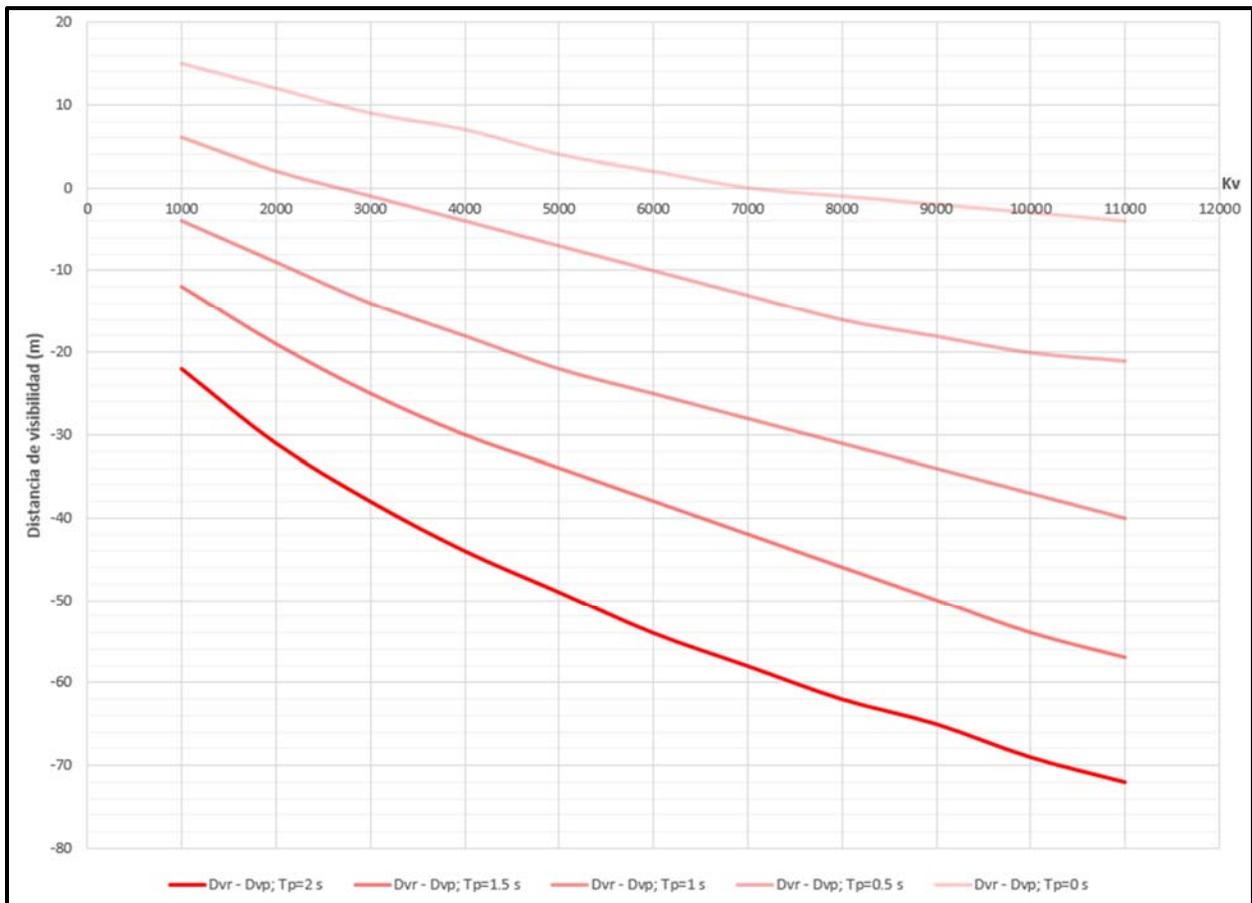


Figura 110. Distancias de visibilidad disponibles resultantes de las iteraciones del nomograma.

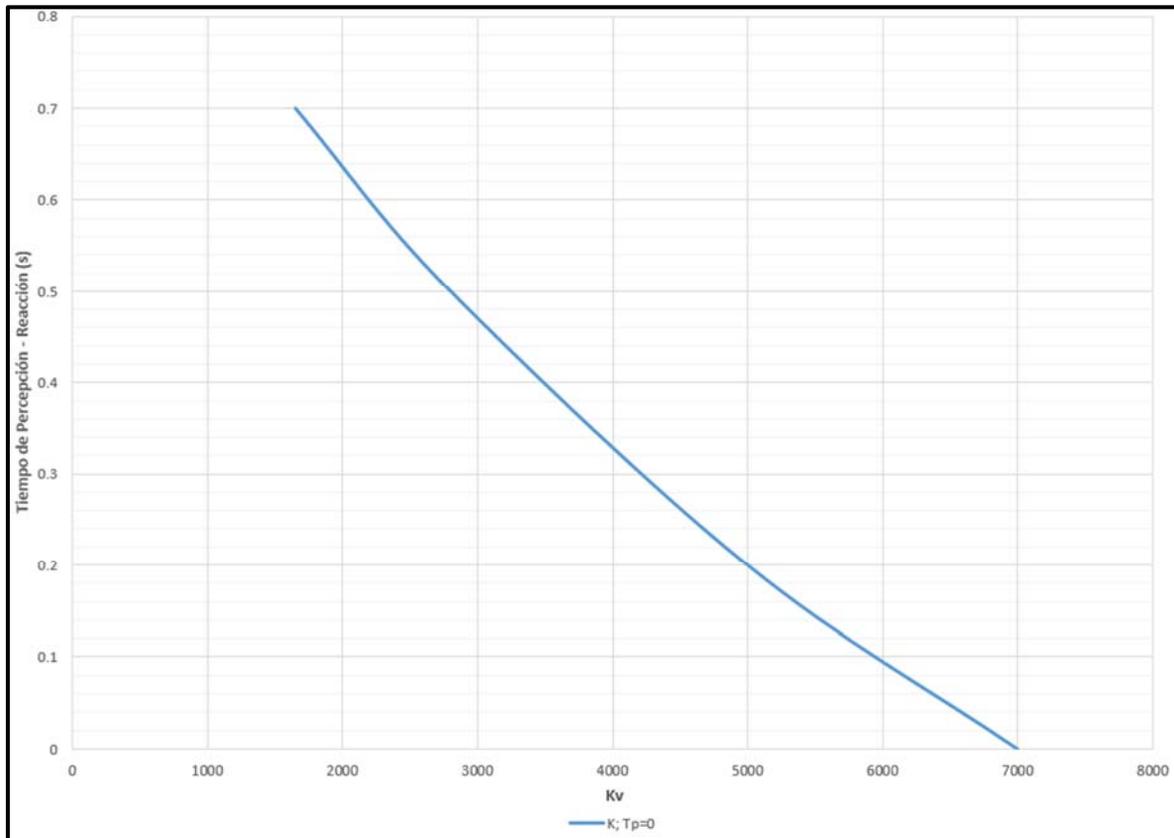


Figura 111. Tiempos de percepción y reacción en los que aún hay distancia de visibilidad disponible.

En la Figura 111 se puede observar que para Kv entre 1650 y 7000 en los tiempos de percepción y reacción observados el radar tiene visibilidad disponible.

7.3. Comportamiento del vehículo semiautónomo ante entradas y salidas

Luego de analizar los resultados obtenidos de las observaciones que se efectuaron y comparar los mismos con las disposiciones de las marcas viales de otros países, surge la necesidad de hacer una propuesta de mejoras del diseño de algunas marcas viales contempladas en la instrucción 8.2 IC (Ministerio de Fomento, 1987), con el fin de aumentar la continuidad del funcionamiento del sistema de conducción semiautónoma y reducir las cesiones del control localizadas.

Beneficiando a que los vehículos automatizados puedan mantener el control a lo largo de las carreteras, con especial énfasis en las autovías y autopistas, logrando esto una mayor seguridad del conjunto de la circulación del tráfico mixto (conducción convencional – conducción automatizada), ya que habrá menos salidas de carril al no ser capaces los conductores de reaccionar en un tiempo prudente, como ya se ha demostrado en otros estudios.

Inicialmente las propuestas que se plantean son medidas de bajo coste, haciéndose necesaria una actualización de la instrucción 8.2 IC, la misma pendiente desde hace ya algunos años. Luego de ver como los vehículos autónomos pueden representar una mejora para la seguridad vial y con miras a aprovechar el potencial de esto, se considera que no se deberían demorar las actuaciones correspondientes en un marco estandarizado.

Las propuestas que se han planteado en el presente trabajo son inicialmente aumentar la longitud de las marcas viales discontinuas en entradas, salidas, convergencias y divergencias existentes para potenciar el guiado de los sistemas de conducción autónoma. En la Figura 112 y Figura 113 se representan las propuestas para los carriles de cambio de velocidad directos y en paralelo, suponiendo la eliminación del vano sin marca vial.

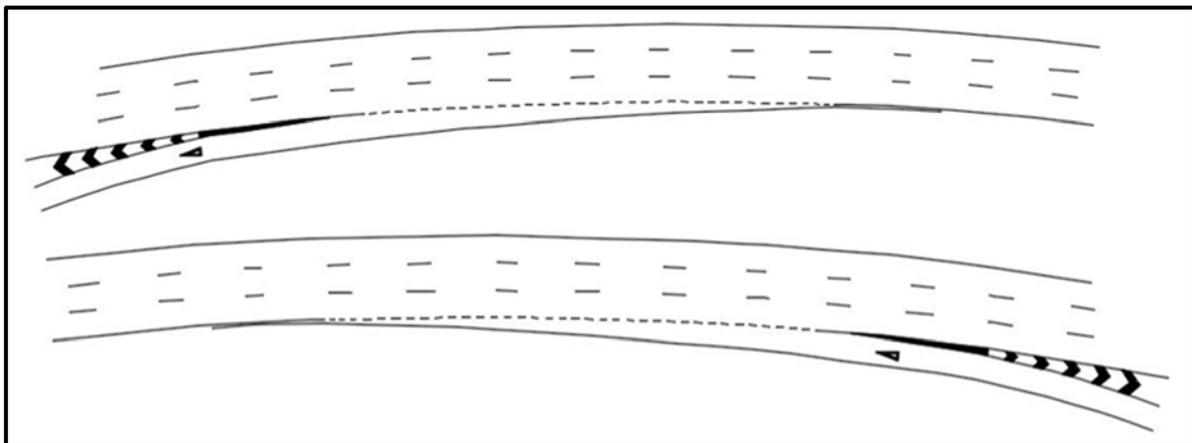


Figura 112. Propuesta de prolongación de las marcas viales de separación en carriles de cambio de velocidad directo.

Por otro lado, en las conexiones en las que no existe el carril de cambio de velocidad, para la propuesta se hace necesario de igual forma establecer marcas viales discontinuas que cierren el vano sin marcas (ver Figura 114). De igual forma en las secciones de carretera donde se producen aumentos o pérdidas de carril, se propone prolongar las marcas viales discontinuas de separación de carriles de forma paralela o en disposición en cuña si se quisiera favorecer la continuidad del tráfico pesado (ver Figura 115).

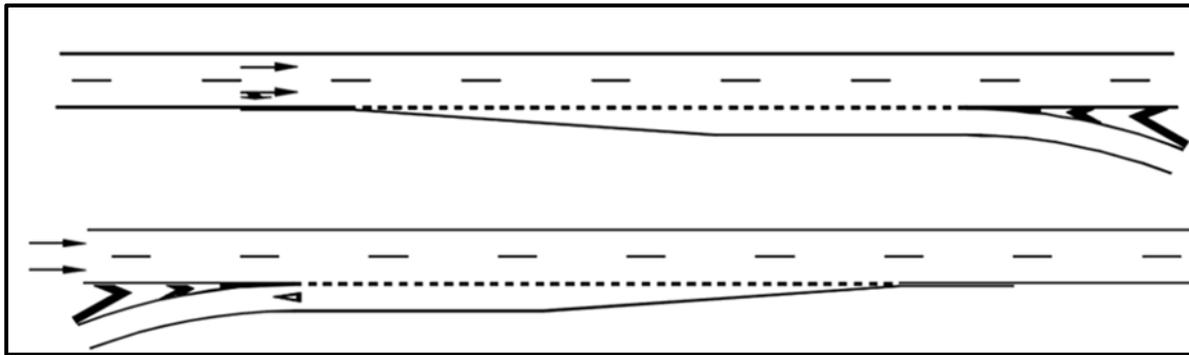


Figura 113. Propuesta de prolongación de las marcas viales de separación de carril de cambio de velocidad en paralelo.

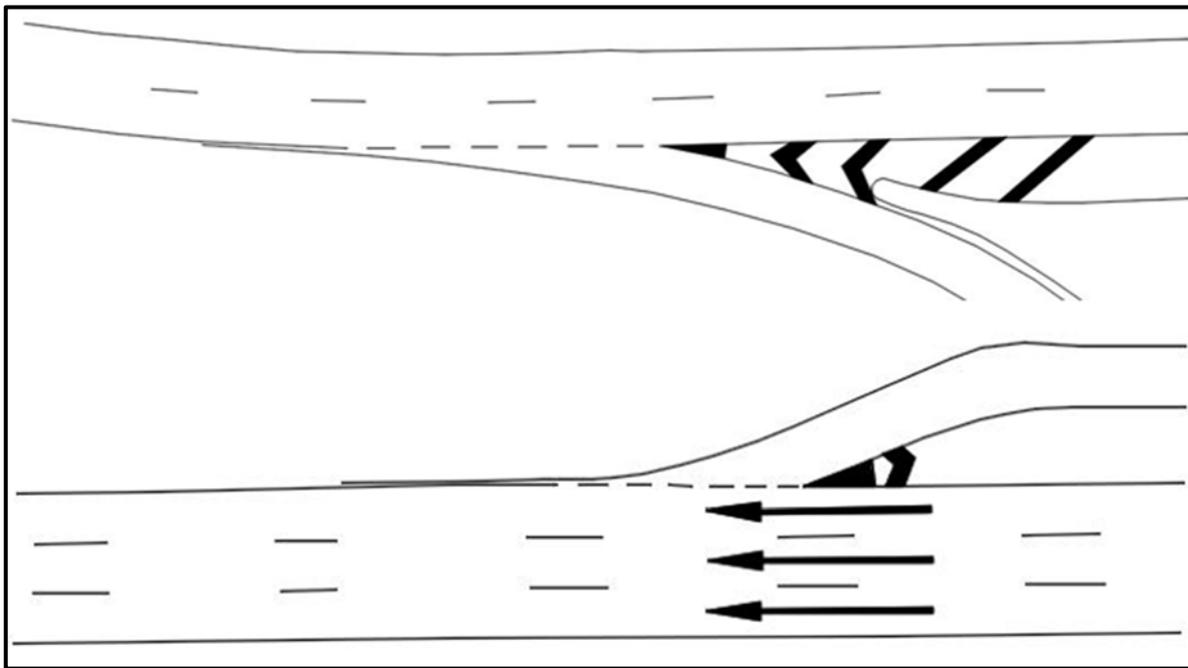


Figura 114. Propuesta de marcas viales discontinuas de prolongación del borde de calzada en salidas y entradas sin carril de cambio de velocidad

Se deben evitar las discontinuidades, de cualquier tipo, en la ejecución de las marcas viales. Se deben evitar cambios bruscos en el tipo de pintura, geometría de la misma, reluctancia, o calidad de los materiales utilizados, todo esto para asegurar un mejor funcionamiento de los vehículos autónomos ante este tipo de situaciones.

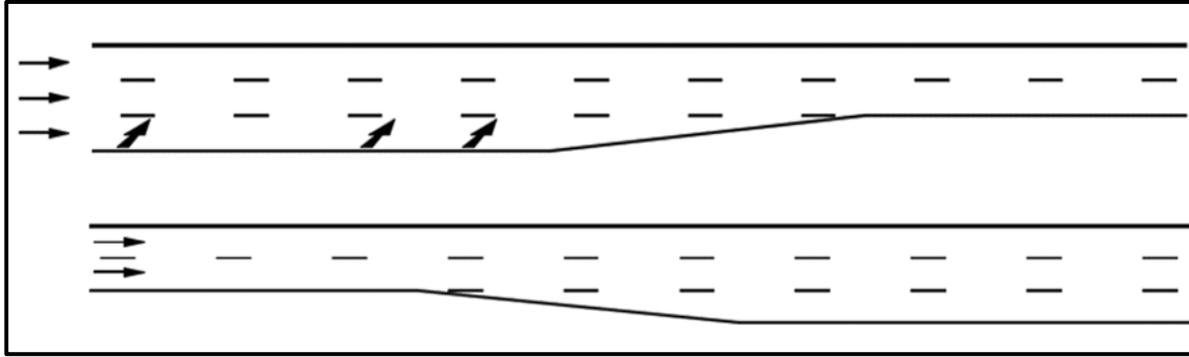


Figura 115. Propuesta de prolongación de marca vial discontinua de separación de carriles en aumentos o pérdidas de carriles.

8. CONCLUSIÓN DEL ESTUDIO

Los datos observados y analizados en este trabajo final de master indican que, actualmente, los vehículos con sistemas semiautónomos de conducción tienen la capacidad de circular en modo automático siempre y cuando los mismos se encuentren dentro del dominio operacional para el que fueron diseñados, salvo algunos casos puntuales en los que no son capaces de mantener el control de manera continuada.

- Se ha verificado la hipótesis de que Existe una correlación entre la geometría de la vía y la velocidad máxima a la que puede circular un vehículo controlado por un sistema semiautónomo de conducción. Surgiendo de esto un nuevo concepto de velocidad, que es la velocidad segura para la conducción automatizada, es decir, la velocidad máxima asociada a cada elemento de la vía que permite que el sistema de conducción automatizada mantenga el control. Se podría llamar de forma abreviada Velocidad Automatizada (AS).

Surge de igual forma el concepto de consistencia de la conducción automatizada, que toma en consideración las diferencias entre las expectativas de los conductores, basadas en la velocidad que ellos creen que se puede desarrollar y su seguridad con el sistema de conducción autónoma continuando en funcionamiento, y la velocidad automatizada que realmente se puede desarrollar en esa curva.

Para mitigar este problema ligado a la seguridad vial, se va haciendo necesario crear un sistema en el que se identifique cada tramo de red viaria con su nivel de automatización correspondiente en el cual los vehículos pueden circular correctamente, para así modificar las expectativas tanto del conductor como para el sistema y, reducir la posible inconsistencia en algún tramo viario. De esta necesidad surge un nuevo concepto que ayudaría a mitigar esta problemática de seguridad, se trata del nivel de servicio para la conducción automatizada en cada tramo de carretera.

- Se ha verificado la hipótesis de que existe una correlación entre la continuidad de las marcas viales de guiado y la disminución de las cesiones de control al conductor por parte de un sistema semiautónomo de conducción.

Se puede alegar que la normativa vigente de marcas viales presenta problemas que impiden que los sistemas autónomos de conducción circulen de manera continua sin ceder el control. A raíz del problema observado, y tras investigar las normas de otros países, se realizaron propuestas para la mejora de la actual Instrucción de señalización horizontal, así a la misma se le podrá incorporar dichas mejoras en una próxima edición. Las propuestas se centran en la eliminación del vano sin marcas viales en entradas, salidas, convergencias y divergencias.

- En el caso de los acuerdos convexos, los mismos fabricantes reconocen esto como una limitante del sistema, ya que el mismo representa casos de cesión de control del sistema de conducción autónoma. En una muestra de 24 acuerdos convexos en los que el sistema no lograba mantener el control se pudieron observar qué Kv serían los necesarios para que al radar le quedara distancia de visibilidad disponible en estos acuerdos convexos.

Los tiempos de percepción y reacción de los vehículos autónomos son menores que los estipulados en la norma 3.1 IC, asegurando esto distancias de visibilidad menores, representando esto a una mejora en la seguridad vial. Contando con estos sistemas de conducción automatizada se podría minimizar los posibles accidentes provocados por la falta de atención del usuario, o la capacidad del mismo para reaccionar ante situaciones adversas.

9. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Partiendo de los resultados obtenidos en este trabajo de fin de master, surge la necesidad de investigar adicionalmente algunos puntos que se considera que son importantes para el correcto desarrollo de la conducción automatizada.

Se debe profundizar en el análisis de la influencia en la velocidad automatizada de la velocidad de variación de la curvatura en planta y de la curvatura de las marcas viales de borde de carril. Se deben seguir haciendo muchas más observaciones con marcas diferentes y modelos de vehículos semiautónomos

Respecto a las marcas viales, se podría profundizar más en el análisis de la geometría real de las marcas viales que suponen una variación de la curvatura tridimensional, dentro de esto con posibles cambios bruscos localizados por errores cometidos durante la ejecución de las mismas. También, se deben hacer observaciones de otros patrones de señalización horizontal, al igual que observaciones sistemáticas del estado de conservación de estas marcas viales. Se podría observar la relación que podría guardar el estado del pavimento que pueda dar lugar a una detección errónea de marca vial o una cesión de control al conductor.

Estudiar el posible efecto que tengan los cambios meteorológicos (lluvia, nieve, etc.). Otro tema de interés de estudio que vimos que pueden afectar a la lectura de las marcas viales y la conducción segura es la reparación de grietas longitudinales y fresados parciales del carril y el efecto que estas reparaciones pueden significar para el correcto dominio del sistema autónomo.

Se debe profundizar en el análisis de la problemática de acuerdos cóncavos y su influencia en los sistemas de conducción automatizada. De igual forma, hacer más pruebas en otros elementos geométricos como son los solapes de acuerdos convexos sobre una curva, para ver el efecto que puede producir esta situación.

10. PUBLICACIONES RESULTANTES DE ESTA INVESTIGACIÓN

- García García, A., Padovani Baez, P. V., & Camacho-Torregrosa, F. J. (2017) Influencia de la infraestructura de carreteras en la velocidad de los vehículos automatizados. CA Carreteras /, (216), 52-61.
- García García, A., Padovani Baez, P. V., & Camacho-Torregrosa, F. J. (2017). Mejoras en el diseño de marcas viales para aumentar la eficacia de los vehículos automatizados, (RUTAS 173 octubre-diciembre 2017. Págs. 5-12. ISSN: 1130-7102).

11. CONCLUSIÓN

Una vez realizado el presente estudio de investigación catalogado como Trabajo de fin de Máster, se puede afirmar que se han abordado temas de actualidad importantes que afectarán el desempeño de áreas importantes de nuestra profesión y algunas más relacionadas al desarrollo del mismo.

Con la investigación realizada y correctamente recogido en el presente documento, se consideran cumplidos los objetivos planteados en este estudio. En este trabajo se ha profundizado en el estudio de la interacción del diseño y la infraestructura de carreteras con los vehículos automatizados. Detallando posteriormente a esto la metodología utilizada para la recolección de datos, así también los resultados obtenidos. Finalmente se comprueban las tres hipótesis planteadas para su investigación, y estableciendo las conclusiones, análisis y discusión de las mismas. También, se proponen diversas futuras líneas de investigación que podrían aportar material importante acerca del tema, con lo que finalmente se da por concluido el presente Trabajo de fin de Máster.

En Valencia, a 22 de junio de 2018,

Pedro Vinicio Padovani Báez.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Anderson, J. M., Kalra, N., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C., & Oluwatola, O. A. (2016). *Autonomous Vehicle Technology A Guide for Policymakers*.
- Ashley, S. (2016). Centimeter-accurate GPS for self-driving vehicles - SAE International. *SAE International*, 1–2. Retrieved from <http://articles.sae.org/15067/>
- Bagloee, S. A., Tavana, M., Asadi, M., & Oliver, T. (2016). Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies. *Journal of Modern Transportation*, 24(4), 284–303. <https://doi.org/10.1007/s40534-016-0117-3>
- Barell, J., Gong, P., Trent, A., Bianchessi, A., Dadabhoy, J., Ezawa, K., ... Yoshida, A. (2016). *Car of the Future v3.0*.
- Bella, F. (2014). Effects of combined curves on driver's speed behavior: Driving simulator study. *Transportation Research Procedia*, 3(July), 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.095>
- Bengler, K., Dietmayer, K., Farber, B., Maurer, M., Stiller, C., & Winner, H. (2014). Three decades of driver assistance systems: Review and future perspectives. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6(4), 6–22. <https://doi.org/10.1109/MITS.2014.2336271>
- Bidulka, S., Sayed, T., & Hassan, Y. (2002). Influence of vertical alignment on horizontal curve perception. Phase I: Examining the hypothesis. *Transportation Research Record*, (1796), 12–23. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0036942886&partnerID=tZOtx3y1>
- Bosetti, P., Da Lio, M., & Saroldi, A. (2015). On Curve Negotiation: From Driver Support to Automation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(4), 2082–2093. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2395819>
- BOUDETTE NEAL E. (2017). Building a Road Map for the Self-Driving Car. *New York Times*, 2–5. Retrieved from <https://www.nytimes.com/2017/03/02/automobiles/wheels/self-driving-cars-gps-maps.html>
- Camacho-Torregrosa, F. J., Pérez-Zuriaga, A. M., Campoy-Ungría, J. M., & García-García, A. (2013). New geometric design consistency model based on operating speed profiles for road safety evaluation. *Accident Analysis and Prevention*, 61, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.10.001>
- Cameras and Sensors for Embedded Vision. (2017).
- Cameras, O., Lin, S., Ke, J., Liu, H., & Liao, J. (2014). Three-dimensional measurement, horizontally-aligned omni-directional camera. 1., (Iccas).
- Campbell, J. (2015). Using an Embedded Vision Processor to Build an Efficient Object Recognition System, c(May).
- CEDEX. (1998). NLT-330/98.
- Cunningham, W. (2016). Forget GPS , Civil Maps gives self-driving cars street smarts. Retrieved from <https://www.cnet.com/roadshow/news/forget-gps-civil-maps-gives-self-driving-cars-street-level-positioning/>
- Delphi. (1999). Adaptive Cruise Control, 1–2.
- Delphi. (2009a). Delphi Collision Mitigation System, (1), 1–2. Retrieved from www.delphi.com

- Delphi. (2009b). Delphi Intelligent Forward View Camera (200 Series), (1), 900249.
- Delphi. (2011). Delphi Integrated Radar and Camera System, 110223.
- Delphi. (2017). Delphi Parking Guidance System.
- DGT. (2015). Autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general. Retrieved from <http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/normativa-legislacion/otras-normas/modificaciones/15.V-113-Vehiculos-Conduccion-automatizada.pdf>
- DGT. (2017). *Balance seguridad vial 2017*.
- Digi-key electronics. (2016). Radar Sensing for Driverless Vehicles.
- Dogan, E., Rahal, M. C., Deborne, R., Delhomme, P., Kemeny, A., & Perrin, J. (2017). Transition of control in a partially automated vehicle: Effects of anticipation and non-driving-related task involvement. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 46, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.01.012>
- Du, X., & Tan, K. K. (2016). Comprehensive and Practical Vision System for Self-Driving Vehicle Lane-Level Localization. *IEEE Transactions on Image Processing*, 25(5), 2075–2088. <https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2539683>
- Ehrlich, J., Gruyer, D., Orfila, O., & Hautière, N. (2016). Autonomous Vehicle: The Concept of High Quality of Service Highway. *Vehicle and Road Automation*.
- Eidehall, A. (2004). *An automotive lane guidance system*. *Control.Isy.Liu.Se*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:An+Automotive+Lane+Guidance+System#0>
- El Natour, G., Ait-Aider, O., Rouveure, R., Berry, F., & Faure, P. (2015). Toward 3D reconstruction of outdoor scenes using an MMW radar and a monocular vision sensor. *Sensors (Switzerland)*, 15(10), 25937–25967. <https://doi.org/10.3390/s151025937>
- Embedded Vision Alliance. (2017). Processors for Embedded Vision, 1–2. Retrieved from <https://www.embedded-vision.com/technology/programmable-devices>
- Fang, L., & Wang, X. (2017). Lane Boundary Detection Algorithm Based on Vector Fuzzy Connectedness. *Cognitive Computation*, 9(5), 634–645. <https://doi.org/10.1007/s12559-017-9483-3>
- Fernandes, P., Nunes, U., & Member, S. (2012). Platooning With IVC-Enabled Autonomous Vehicles : Strategies to Mitigate Communication Delays , Improve Safety and Traffic Flow, 13(1), 91–106.
- Gibson, D. (2017). Cruise control and adaptive cruise control: the complete guide. *Auto Express*, 3–7. Retrieved from <http://www.autoexpress.co.uk/car-tech/98225/cruise-control-and-adaptive-cruise-control-the-complete-guide>
- Gómez Recio, S. (2016). Los coches autónomos podrán liderar una reducción del 93% de los accidentes en 2040.
- González, D., Pérez, J., Lattarulo, R., Milanés, V., & Nashashibi, F. (2014). Continuous curvature planning with obstacle avoidance capabilities in urban scenarios. *2014 17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2014*, 1430–1435. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6957887>
- González, D., Pérez, J., Milanés, V., & Nashashibi, F. (2016). A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation*

Systems, 17(4), 1135–1145. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2498841>

- Gutiérrez Ruiz, T. (2004). *Índice de regularidad internacional*.
- Han, J., Kim, D., Lee, M., & Sunwoo, M. (2012). Enhanced road boundary and obstacle detection using a downward-looking LIDAR sensor. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(3), 971–985. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2182785>
- Hassan, Y., & Easa, S. M. (2003). Effect of Vertical Alignment on Driver Perception of Horizontal Curves. *Journal of Transportation Engineering*, 129(4), 399–407. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2003\)129:4\(399\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:4(399))
- Hervieu, A., & Soheilian, B. (2013). Road side detection and reconstruction using LIDAR sensor. *2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, (iv), 1247–1252. <https://doi.org/10.1109/IVS.2013.6629637>
- Hikita, M. (2010). An introduction to ultrasonic sensors for vehicle parking.
- Hughes, C., Glavin, M., Jones, E., & Denny, P. (2008). Wide-angle camera technology for automotive applications: a review. *IET Intelligent Transport Systems*. <https://doi.org/10.1049/iet-its>
- Hyundai. (2017a). *Owners manual operation: Elantra*.
- Hyundai. (2017b). *Owners Manual Operation: tucson*.
- International Association of PublicTransport - UITP. (2017). Autonomous vehicles: A potential game changer for urban mobility, 1–8.
- Jang, H., Kim, C., Jo, C., & Sunwoo, M. (2017). DESIGN FACTOR OPTIMIZATION OF 3D FLASH LIDAR SENSOR BASED ON GEOMETRICAL MODEL FOR AUTOMATED VEHICLE AND ADVANCED DRIVER ASSISTANCE SYSTEM APPLICATIONS. *International Journal of ...*, 18(1), 147–156. <https://doi.org/10.1007/s12239>
- Jiménez, F., Naranjo, J. E., Anaya, J. J., García, F., Ponz, A., & Armingol, J. M. (2016). Advanced Driver Assistance System for Road Environments to Improve Safety and Efficiency. *Transportation Research Procedia*, 14, 2245–2254. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.240>
- Johnson, C., & Walker, J. (2016). Peak car ownership. *Mobility Transformation*.
- Kazama, K., Nishizaki, K., Shirayuma, Y., Furusho, H., & Mouri, H. (2017). REDUCTION OF PREVIEW DISTANCE IN LANE-KEEPING CONTROL. *International Journal of ...*, 18(4), 743–750. <https://doi.org/10.1007/s12239>
- Krosse, B., Maas, S., Nunen, E. Van, Zwijnenberg, H., Mosebach, H., Jeffery, D., & Piao, J. (2010). Definition of necessary vehicle and infrastructure systems for Automated Driving, 1–111.
- Labaziewicz, P. (texas I. (2016). Perceiving and understanding the world for ADAS and Autonomous. Retrieved from <http://www.ti.com/product/omap-l137>
- Ministerio de Fomento. (1987). Instrucción de Carreteras 8.2 IC: Marcas viales.
- Ministerio de Fomento. (2011). Recomendaciones sobre balizamiento de carreteras.
- Ministerio de Fomento. (2014a). Norma 3.1 IC, 239.
- Ministerio de Fomento. (2014b). Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).

- Ministerio de Interior. (2015). Real Decreto Legislativo 6/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, 1–39. Retrieved from <https://www.boe.es/buscar/pdf/2015/BOE-A-2015-11722-consolidado.pdf>
- Ministerio de la Presidencia. (2015). Reglamento General de Circulación. *BOE, Boletín Oficial Del Estado*, 23514, 1–131. Retrieved from <http://boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2003-23514>
- Morgan Stanley. (2013). *Autonomous cars: Self-driving the new auto industry paradigm*.
- Motorpasion Branded-Collaborators. (2017). Los cuatro retos a superar por la segunda generación de coches autónomos antes de triunfar. Retrieved from <https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/los-cuatro-retos-a-superar-por-la-segunda-generacion-de-coches-autonomos-antes-de-triunfar>
- Naciones Unidas. (2007). *Convención sobre la circulación vial de 1968 y Acuerdo europeo que complementa la Convención*.
- Naranjo-Hernandez, José E., Jimenez-Alonso, Felipe, Clavijo-Jimenez, Miguel, Gomez-Casado, O. (2016). Guiado de Vehículos autónomos Mediante Lidar 3D Siguiendo un elemento de referencia, 2017.pdf.
- Naujoks, F., Wiedemann, K., Schömig, N., Jarosch, O., & Gold, C. (2018). Expert-based controllability assessment of control transitions from automated to manual driving. *MethodsX*. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.05.007>
- Ors, A. O. (2017). Choosing the Optimum Mix of Sensors for Driver Assistance and Autonomous Vehicles, 1–23.
- Patole, S. M., Torlak, M., Wang, D., & Ali, M. (2017). Automotive Radars: A review of signal processing techniques. *IEEE Signal Processing Magazine*, 34(2), 22–35. <https://doi.org/10.1109/MSP.2016.2628914>
- Pendleton, S. D., Andersen, H., Du, X., Shen, X., Meghjani, M., Eng, Y. H., ... Jr, M. H. A. (2017). Perception, Planning, Control, and Coordination for Autonomous Vehicles. *Machines*, 5(6), 1–54. <https://doi.org/10.3390/machines5010006>
- Peters, D. L., Zhang, J. Z., & Vishwanathan, H. (2017). Traffic sign recognition in autonomous vehicles using edge detection, 1–8.
- Polychronopoulos, A., Scheunert, U., & Tango, F. (2004). Centralized data fusion for obstacle and road borders tracking in a collision warning system. *Research Gate*, (January).
- Recio, S. G. (2016). Visión internacional de los ADAS. In *Conferencias CESVIMAP* (pp. 1–13).
- Richl, L., & Sayed, T. (2005). Effect of speed prediction models and perceived radius on design consistency. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(2), 388–399. <https://doi.org/10.1139/l04-103>
- Robertson, A., Brett, M., & Reuter, R. (2010). Increasing Automotive Safety Through Embedded Radar Technologies. *White Paper*. Retrieved from www.nxp.com/assets/documents/data/en/fact-sheets/AUTORADARFS.pdf
- SAE. (2016). U.S. Department of Transportation's New Policy on Automated Vehicles Adopts SAE International's Levels of Automation for Defining Driving Automation in On-Road Motor Vehicles. *SAE International*, 1. <https://doi.org/P141661>
- SAE International. (2014). J3016: Surface Vehicle Recommended Practice, 4970, 724–776.



<https://doi.org/10.4271/2012-01-0107>.

- SAE International. (2016). NHTSA Adopts SAE Internations Standard Defining Autonomous Vehicles, 1–2. Retrieved from <https://www.sae.org/news/3550/>
- Shammas, S. M. (2017). The future of driving: A look into the technology behind autonomous vehicles.
- Shuman, V. (Schuman C. G. (2016). Explotación de la red vial & sistemas inteligentes de transporte. *World Road Assosiation (PIARC)*, 1–21.
- Tesla. (2016). Model S Owner’s Manual v8.0. *Unknown*.
- Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., Stavens, D., Aron, A., Diebel, J., ... Mahoney, P. (2006). Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge, 23(April), 661–692. <https://doi.org/10.1002/rob>
- Tomás Martínez, P., Moreno García-Cano, J., Arriola Ballesteros, J. J., & Blanco Bergareche, A. I. (2017). Vehículos autónomos en España, hacia una disminucion drástica de la accidentalidad y la congestión. *Routes*, 373, 37–42.
- Tráfico y Seguridad Vial. (2017). 1.160 Fallecidos En Accidente De Tráfico. 2017, 6–9. Retrieved from <http://revista.dgt.es/es/noticias/nacional/2017/01ENERO/0103balance-accidentes-2016.shtml#.WQ2h79LyjIV>
- Valero Jorge. (2016). Así funcionan los sensores LIDAR de los coches autónomos. *Innovacion Motor*, 2016–2018. Retrieved from <https://hipertextual.com/2016/03/sensores-lidar>
- Vehículos conectados Vehículos autónomos. (2017). *Routes/Roads*, 373.
- Volvo. (2017). Manual volvo xc90.
- Wang, F., & Easa, S. M. (2009). Validation of Perspective-View Concept for Estimating Road Horizontal Curvature. *Journal of Transportation Engineering*, 135(2), 74–80. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2009\)135:2\(74\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:2(74))
- Wang, J., Xu, X., Liu, D., Sun, Z., & Chen, Q. (2014). Self-learning cruise control using kernel-based least squares policy iteration. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(3), 1078–1087. <https://doi.org/10.1109/TCST.2013.2271276>
- Wang, T., Zheng, N., Xin, J., & Ma, Z. (2011). Integrating millimeter wave radar with a monocular vision sensor for on-road obstacle detection applications. *Sensors*, 11(9), 8992–9008. <https://doi.org/10.3390/s110908992>
- Wei, J., Snider, J. M., & Dolan, J. M. (2014). A Behavioral Planning Framework for Autonomous Driving A Behavioral Planning Framework for Autonomous Driving, (Iv), 458–464.



ANEXO I: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y VELOCIDADES AUTOMATIZADAS DE LAS CURVAS OBSERVADAS

AUTOMATED DRIVING SAFE SPEED – DATA COLLECTION

CURVA	CARRERA	PK	TIPO	Radio (m)	Ángulo Deflexión (º)	Desarrollo (m)	CCR (g/m)	Vlímite	Peralte (3.HIC-Fricción-1998)	Ft	Velocidad de Diseño	Vobjetivo	AS Ida	Marca Vial		Observaciones	
														N/A	N/A		N/A
1	CV-310	02+850	C2C	350	-20.2	+158.	+127.82	+80.	+7.	+1.1	+90.19	82	82	N/A	N/A	C/C	-
2	CV-310	03+071	C2C	330	+18.57	+164.	+113.24	+60.	+7.	+1.1	+86.13	80	80	N/A	N/A	C/C	codo MV ext
3	CV-310	05+120	C2C	1055	-12.28	+289.	+42.48	+80.	+2.97	+0.7	+115.	115	115	N/A	N/A	D/C	-
4	CV-310	05+600	C2C	1655	-7.95	+350.	+22.71	+80.	+2.01	+0.4	+116.06	118	118	N/A	N/A	D/C	-
5	CV-310	06+180	C2C	580	+12.06	+142.	+84.93	+80.	+4.96	+0.9	+101.77	102	102	N/A	N/A	C/C	-
6	CV-310	06+750	C2C	201	-50.59	+181.	+279.51	+60.	+7.	+1.3	+71.45	55-70	NP	N/A	N/A	C/C	KV brusco
7	CV-336	08+500	MC	1093	+22.41	+486.	+46.12	+90.	+2.88	+0.7	+114.72	90	NP	N/A	N/A	C/D	No se alcanza velocidad de diseño debido a que la misma esta proxima a una glorieta.
8	CV-336	09+970	MC	215	-31.84	+144.	+221.11	+70.	+7.	+1.2	+72.22	65	65	N/A	N/A	C/D	-
9	CV-336	10+500	MC	833	+19.58	+422.	+46.4	+90.	+3.65	+0.7	+105.14	90	NP	N/A	N/A	C/D	No se alcanza velocidad de diseño debido a que la misma esta proxima a una glorieta.
10	CV-368	05+860	C2C	350	+13.45	+127.	+105.88	+70.	+7.	+1.1	+90.16	80	80	N/A	N/A	C/C	-
11	CV-368	04+800	C2C	264	-22.01	+132.	+166.71	+70.	+7.	+1.2	+79.02	60	60	N/A	N/A	C/C	KV suave. Acuerdo Convexo
12	CV-368	04+350	C2C	289	-18.33	+139.	+131.84	+70.	+7.	+1.1	+81.26	66	66	N/A	N/A	D/C	KV medio
13	CV-		C2C	96	-29.23	+58.	+503.95	+50.	+7.	+1.5	+51.46	60-65	NP	N/A	N/A	C/C	KV brusco
14	CV-35	09+030	A	533	-27.89	+311.	+89.69	+100.	+8.	+0.9	+106.31	87	87	N/A	C/D	D/D	-
15	CV-31	02+650	A	196	+72.07	+281.	+256.49	+80.	+8.	+1.3	+72.75	65	65	N/A	N/A	C/D	D/DCV
16	CV-31	02+450	A	517	+6.81	+74.	+92.01	+80.	+8.	+0.9	+106.25	65	65	N/A	N/A	C/D	D/C
17	CV-31	02+350	A	306	-16.11	+98.	+164.39	+80.	+8.	+1.1	+84.57	90	80	N/A	N/A	C/D	D/C
18	CV-31	02+250	A	234	+18.26	+93.	+196.38	+80.	+8.	+1.3	+79.08	75	75	N/A	N/A	C/D	D/D
19	CV-31	01+960	A	749	+4.88	+90.	+54.23	+80.	+7.79	+0.8	+122.96	110	115	N/A	N/A	C/D	D/C
20	CV-31	01+790	A	833	+10.14	+152.	+66.69	+80.	+7.33	+0.7	+122.28	95	110	N/A	N/A	C/D	D/C
21	CV-31	01+650	A	2274	-4.28	+150.	+38.55	+80.	+3.47	+0.3	+136.75	110	120	N/A	N/A	C/D	D/C
22	CV-31	00+925	A	564	+22.79	+239.	+95.37	+80.	+8.	+1.1	+111.99	100	120	N/A	N/A	C/D	D/C
23	CV-31	00+585	A	916	+11.1	+252.	+44.04	+80.	+6.89	+0.7	+126.62	100	110	N/A	N/A	C/D	D/C
24	-	-	R	70	-	-	-	+60.	N/A	-	-	40	NP	-	-	-	-
25	-	-	R	60	-	-	-	+60.	N/A	-	-	40	NP	-	-	-	-
26	-	-	R	30	-	-	-	+60.	N/A	-	-	40	NP	-	-	-	-
27	CV-30	02+100	A	1011	+40.43	+732.	+55.24	+100.	+6.43	+0.6	+125.26	120	120	N/A	C/D	D/D	D/C
28	CV-30	04+025	A	568	-21.58	+321.	+67.23	+80.	+8.	+1.1	+112.34	117	117	C/D	D/D	D/D	D/D
29	CV-30	04+650	A	263	+105.69	+501.	+210.97	+70.	+8.	+1.2	+80.9	70	70	C/D	D/D	D/D	D/C
30	CV-30	04+100	A	586	-21.61	+308.	+70.17	+80.	+8.	+0.9	+112.48	105	NP	C/D	D/D	D/D	D/D
31	-	-	R	160	+63.87	+174.	+367.07	+60.	N/A	-	-	60	NP	N/A	N/A	C/D	D/C
32	CV-35	03+450	A	816	-20.6	+364.	+56.6	+80.	+7.42	+0.7	+123.11	110	110	N/A	C/D	D/D	D/C
33	-	-	R	96	-27.43	+58.	+472.95	+60.	N/A	-	-	50	NP	-	-	-	-
34	CV-31	03+900	C2C	210	+71.93	+272.	+264.43	+60.	+7.	+1.2	+71.85	60	70	N/A	N/A	N/A	C/C
35	CV-31	03+450	C2C	260	-15.49	+262.	+59.12	+60.	+7.	+1.1	+76.23	80	80	N/A	N/A	N/A	C/C
36	CV-50	-	-	2056	+6.16	+266.36	+23.11	+90.	+1.66	+0.3	+113.86	100-120	120	-	-	-	-
37	CV-50	-	-	606	-16.31	+186.69	+87.35	+90.	+4.78	+0.9	+101.48	85-93	93	-	-	-	-
38	CV-50	-	-	300	-72.38	+430.87	+167.99	+90.	+7.	+1.1	+83.27	70-80	70	-	-	-	-
39	CV-50	-	-	254	+46.21	+272.25	+169.73	+90.	+7.	+1.1	+75.99	70-75	75	-	-	-	-
40	CV-50	-	-	662	-15.81	+268.91	+58.78	+90.	+4.44	+0.8	+101.04	105-120	120	-	-	-	-
41	CV-50	-	-	459	+32.6	+321.44	+101.41	+90.	+5.95	+1.1	+97.03	85-97	97	-	-	-	-
42	CV-50	-	-	316	-30.04	+207.92	+144.5	+90.	+7.	+1.2	+87.32	85-97	97	-	-	-	-
43	CV-50	-	-	550	+8.74	+117.76	+74.21	+90.	+5.17	+1.1	+101.59	85-100	100	-	-	-	-
44	CV-50	-	-	260	-47.53	+244.63	+194.3	+90.	+7.	+1.1	+76.23	70-77	77	-	-	-	-
45	CV-50	-	-	402	+18.7	+164.3	+113.82	+90.	+6.52	+1.1	+92.13	77-83	80	-	-	-	-
46	CV-50	-	-	725	-34.99	+497.56	+70.32	+90.	+4.11	+0.8	+107.34	100-120	120	-	-	-	-



AUTOMATED DRIVING SAFE SPEED – DATA COLLECTION

Dirección de recorrido: PK Crecientos

CURVA	CARRERA	PK	TIPO	Radio (m)	Ángulo Deflexión (g)	Desarrollo (m)	CCR (g/km)	Vlímite	Peralte (3.1-IC-Trazado-1999)	Ft	Velocidad de Diseño	Vobjetivo	AS ida	Marca Vial	Observaciones
200	CV-305	13+210	C2C	366	+11.65	+98.	+118.89	+70.	+6.88	+11	+90.66	67	67	N/A	C/C
201	CV-305	13+400	C2C	540	+10.95	+116.	+84.37	+70.	+5.25	+09	+97.81	65	65	N/A	C/C
202	CV-305	13+500	C2C	172	-32.06	+110.	+231.5	+70.	+7.	+12	+64.59	50	50	N/A	D/C
203	CV-305	13+600	C2C	277	+15.76	+92.	+171.35	+70.	+7.	+12	+80.67	53	53	N/A	D/C
204	CV-305	13+970	C2C	685	+7.4	+114.63	+84.56	+80.	+4.32	+12	+118.41	72	72	N/A	D/C
205	CV-305	14+100	C2C	270	+24.8	+134.81	+163.96	+80.	+7.	+12	+80.72	65	65	N/A	C/C
206	CV-305	14+200	C2C	350	-3.35	+72.26	+129.42	+80.	+7.	+11	+90.19	70	70	N/A	C/C
207	CV-305	14+350	C2C	258	+15.99	+84.82	+188.55	+80.	+7.	+11	+76.15	70	70	N/A	C/C
208	CV-305	14+500	C2C	236	-34.92	+154.41	+226.17	+80.	+7.	+11	+73.86	60	60	N/A	C/C
209	CV-305	14+700	C2C	295	-23.36	+132.11	+176.79	+80.	+7.	+11	+82.12	70	70	N/A	C/C
210	CV-305	14+850	C2C	240	+27.57	+168.56	+163.54	+80.	+7.	+11	+74.07	70	70	N/A	C/C
211	CV-305	15+120	C2C	181	-33.11	+95.6	+346.31	+80.	+7.	+12	+65.56	50	50	N/A	C/C
212	CV-305	15+240	C2C	182	+28.51	+96.02	+296.9	+80.	+7.	+12	+65.57	65	65	N/A	C/C
213	CV-305	15+400	C2C	198	-23.45	+108.52	+271.41	+80.	+7.	+13	+71.09	55	55	N/A	C/C
214	CV-305	15+500	C2C	306	+11.13	+68.15	+163.29	+80.	+7.	+11	+83.84	55	55	N/A	C/C
215	CV-305	15+600	C2C	181	-25.46	+95.6	+266.3	+80.	+7.	+12	+65.56	50	50	N/A	C/C
216	CV-305	15+800	C2C	174	+63.88	+206.19	+308.82	+80.	+7.	+12	+65.14	53	53	N/A	C/C
217	CV-305	16+030	C2C	246	-17.57	+98.85	+177.71	+80.	+7.	+09	+71.36	72	72	N/A	C/C
218	CV-305	16+500	C2C	624	-11.18	+139.97	+79.91	+80.	+4.67	+11	+112.84	85	85	N/A	D/C
219	CV-305	17+850	C2C	229	-18.72	+93.	+212.06	+40.	+7.	+11	+71.34	57	57	N/A	C/C
47	CV-35	02+706	A	716	-19.5	+315.	+61.9	+80.	+7.95	+09	+122.29	90	100	N/A	C/D
48	CV-35	04+487	A	681	-10.02	+272.	+36.85	+80.	+8.	+07	+115.4	90	100	N/A	D/DCV
49	CV-35	05+353	A	477	+22.61	+250.	+80.42	+20.	+8.	+1	+103.87	105	105	N/A	D/D
50	CV-35	05+608	A	602	+19.51	+316.	+61.73	+20.	+8.	+09	+112.96	100-110	110	N/A	D/D
51	CV-35	09+597	A	1503	+10.58	+347.	+30.48	+20.	+4.77	+05	+133.01	120-125	125	N/A	D/D
52	CV-35	10+347	A	1517	-19.76	+582.	+33.96	+20.	+4.74	+04	+132.65	120-125	125	N/A	D/D
53	CV-35	11+096	A	3658	-4.21	+313.	+13.46	+20.	+2.37	+02	+141.27	120-125	125	N/A	D/D
54	CV-35	12+127	A	1782	+21.4	+789.	+27.12	+20.	+4.18	+04	+134.41	120-125	125	N/A	D/D
55	CV-35	12+934	A	2711	+7.61	+451.	+16.88	+20.	+3.05	+03	+138.22	120-125	125	N/A	D/D
56	CV-35	13+824	A	1797	-5.9	+229.	+25.77	+20.	+4.16	+04	+134.77	120-125	125	N/A	D/D
57	CV-35	14+881	A	2384	-5.85	+297.	+19.7	+20.	+3.35	+03	+136.5	120-125	125	N/A	D/D
58	CV-35	15+706	A	3027	-4.43	+252.	+17.59	+20.	+2.81	+02	+138.84	120-125	125	N/A	D/D
59	CV-35	16+572	A	881	+11.8	+283.	+41.7	+20.	+7.07	+08	+127.66	120-125	125	N/A	D/D
60	CV-35	17+888	A	1842	+26.05	+618.	+31.84	+20.	+4.08	+04	+134.89	120-125	125	N/A	D/D
61	CV-35	18+259	A	842	+25.02	+436.	+57.37	+20.	+7.28	+06	+118.27	120-125	125	N/A	D/D
62	CV-35	19+104	A	902	-21.62	+365.	+59.23	+20.	+6.96	+07	+124.15	120-125	125	N/A	D/D
63	CV-35	19+535	A	582	-16.7	+257.	+64.98	+20.	+8.	+09	+112.45	120-125	125	N/A	D/DCV
64	CV-35	19+993	A	1975	+8.56	+307.	+27.89	+20.	+3.87	+03	+135.02	120-125	125	N/A	D/C
65	CV-35	20+575	A	1000	-27.36	+559.	+46.94	+20.	+6.47	+06	+125.38	120-125	125	N/A	D/C
66	CV-35	21+213	A	1453	-11.15	+451.	+24.71	+20.	+4.89	+05	+132.36	120-125	125	N/A	D/C
67	CV-35	21+395	A	1469	+18.22	+533.	+34.19	+20.	+4.85	+05	+132.79	120-125	125	N/A	D/C
68	CV-35	22+544	A	685	+69.68	+800.	+87.1	+20.	+8.	+07	+115.73	120-125	125	N/A	D/C
69	CV-35	23+650	A	833	+47.28	+628.	+75.29	+20.	+7.33	+07	+122.24	120-125	125	N/A	D/C
70	CV-35	24+100	A	655	-83.71	+934.	+96.05	+20.	+8.	+08	+114.32	120-125	125	N/A	D/C
71	CV-35	25+233	A	904	-35.63	+608.	+58.6	+20.	+6.94	+07	+127.91	120-125	125	N/A	D/C
72	CV-35	25+233	A	1936	-10.2	+273.	+37.36	+20.	+3.93	+04	+135.12	120-127	127	N/A	D/C

con 60 gira pero pisa la línea
no recupera control desde curva anterior

En vuelta gira pero se sale
giro muy brusco (difícil) a 65

Ida (55) mantiene el control pero no gira



Dirección de recorrido: PK Decrecientes

CURVA	CARRETERA	PK	TIPO	Radio (m)	Ángulo Deflexión (g)	Desarrollo (m)	CCR (g/km)	Vlmita	Peralte (3-H-C-Trazado-1959)	Ft	Velocidad de Disco	Vobjetivo	AS Vuelta	Marca Vial	Observaciones
1	CV-310	01+850	C2C	350	+20.1962	158	127.8241	80.0000	7.0000	0.113	90.19	78	75	N/A	No posible con 78 como MV ext. VER FOTO
2	CV-310	03+071	C2C	330	-18.5718	164	113.2427	60.0000	7.0000	0.107	86.13	75-80	NP	N/A	
3	CV-310	05+120	C2C	1055	+12.2764	289	42.4789	80.0000	2.5745	0.069	115.00	115	115	N/A	
4	CV-310	05+600	C2C	1555	+7.5487	350	22.7106	80.0000	2.0055	0.044	116.06	117	117	N/A	
5	CV-310	06+180	C2C	580	-12.0607	142	84.9345	80.0000	4.5555	0.091	101.77	107	107	N/A	
6	CV-310	06+750	C2C	201	+50.5915	181	275.5110	60.0000	7.0000	0.130	71.45	95-70	NP	N/A	KV brusco
7	CV-336	08+500	MC	1088	-22.4135	486	46.1183	90.0000	2.8941	0.066	114.55	120	120	N/A	
8	CV-336	09+970	MC	210	+31.8399	144	221.1104	70.0000	7.0000	0.121	71.46	62-85	60	N/A	
9	CV-336	10+500	MC	828	-19.5809	422	46.4002	90.0000	3.6692	0.068	104.95	120	120	N/A	
10	CV-368	05+860	C2C	350	-13.4472	127	105.8835	70.0000	7.0000	0.113	90.16	82-95	82	N/A	
11	CV-368	04+800	C2C	264	+22.0063	132	166.7144	70.0000	7.0000	0.116	79.02	65-95	65	N/A	KV suave
12	CV-368	04+350	C2C	289	+18.3261	139	131.8424	70.0000	7.0000	0.110	81.26	65-90	65	N/A	KV medio
13	CV-		C2C	96	+29.2291	58	503.9500	50.0000	7.0000	0.147	51.46	60-65	NP	N/A	KV brusco
14	CV-35	09+030	A	529	+27.8943	311	89.6923	100.0000	8.0000	0.087	105.96	107	107	N/A	
15	CV-31	02+650	A	150	-72.0723	281	256.4851	-	8.0000	0.133	71.60	NP	NP	N/A	Esta Curva no se hace en este sentido
16	CV-31	02+450	A	517	-6.8085	74	92.0068	-	8.0000	0.092	106.25	NP	NP	N/A	Esta Curva no se hace en este sentido
17	CV-31	02+350	A	306	+16.1105	98	164.3929	-	8.0000	0.104	84.57	NP	NP	N/A	Esta Curva no se hace en este sentido
18	CV-31	02+250	A	254	+18.263	93	196.3763	-	8.0000	0.130	79.08	NP	NP	N/A	Esta Curva no se hace en este sentido
19	CV-31	01+960	A	749	-4.8807	90	54.2300	-	7.7872	0.081	122.96	NP	NP	N/A	Esta Curva no se hace en este sentido
20	CV-31	01+790	A	819	-10.1369	152	66.6901	-	7.4026	0.068	121.58	NP	NP	N/A	Esta Curva no se hace en este sentido
21	CV-31	01+650	A	2266	+4.282	150	28.5467	-	3.4841	0.030	136.61	NP	NP	N/A	Esta Curva no se hace en este sentido
22	CV-31	00+925	A	559	-22.7959	239	95.3720	-	8.0000	0.095	111.44	NP	NP	N/A	Esta Curva no se hace en este sentido
23	CV-31	00+585	A	910	-11.0972	252	44.0365	-	6.9156	0.069	126.95	NP	NP	N/A	Esta Curva no se hace en este sentido
24	-	-	R	70	-	-	-	-	N/A	-	-	NP	NP	-	Esta Curva no se hace en este sentido
25	-	-	R	60	-	-	-	-	N/A	-	-	NP	NP	-	Esta Curva no se hace en este sentido
26	-	-	R	30	-	-	-	-	N/A	-	-	NP	NP	-	Esta Curva no se hace en este sentido
27	CV-30	02+100	A	1005	-40.434	732	55.2383	100.0000	6.4510	0.058	125.04	NP	NP	N/A	
28	CV-30	04+025	A	562	+21.581	321	67.2290	80.0000	8.0000	0.095	111.73	117	100	N/A	
29	CV-30	04+650	A	256	-105.694	501	210.9665	70.0000	8.0000	0.116	79.82	70	NP	N/A	
30	CV-30	04+100	A	593	+21.612	308	70.1698	80.0000	8.0000	0.090	113.10	105	NP	N/A	
31	-	-	R	160	+63.87	174	367.0661	60.0000	N/A	-	-	60	NP	N/A	
32	CV-35	03+450	A	812	+20.603	364	56.6016	80.0000	7.4436	0.072	122.89	110	110	N/A	
33	-	-	R	96	-27.431	58	472.9517	60.0000	N/A	-	-	50	NP	-	
34	CV-31	03+900	C2C	210	-71.926	272	264.4331	60.0000	7.0000	0.124	71.85	60	NP	N/A	
35	CV-31	03+450	C2C	260	+15.49	262	59.1222	60.0000	7.0000	0.106	76.23	80	NP	N/A	
36	CV-50	-	-	2056	-6.157	266.356	23.1142	90.0000	1.665	0.033	113.86	100-120	120	-	
37	CV-50	-	-	606	+16.307	186.686	87.3502	90.0000	4.782	0.086	101.48	85-90	90	-	
38	CV-50	-	-	300	+72.384	430.871	167.9945	90.0000	7.000	0.112	83.27	75-80	75	-	
39	CV-50	-	-	254	-46.211	272.252	169.7348	90.0000	7.000	0.109	75.99	70-74	73	-	



Dirección de recorrido:		PK Decrecientes															
CURVA	CARRERA	PK	TIPO	Radio (m)	Ángulo Deflexión (g)	Desarrollo (m)	CCR (g/km)	Vímite	Peralte (3.H.C. Trazado-1899)	Ft	Velocidad de Diseño	Vobjetivo	AS Vuelta	Marca Vial	Observaciones		
40	CV-50	-	-	662	+15.806	268.913	58.772	90.0000	4.443	0.077	101.04	100-120	120	-	-		
41	CV-50	-	-	459	-32.597	321.442	101.4090	90.0000	5.951	0.102	97.08	85-95	95	-	-		
42	CV-50	-	-	316	-430.043	207.916	144.4971	90.0000	7.000	0.120	87.32	83-85	83	-	-		
43	CV-50	-	-	550	-8.739	117.762	74.2130	90.0000	5.175	0.096	101.59	85-95	95	-	-		
44	CV-50	-	-	260	+47.532	244.628	194.3049	90.0000	7.000	0.106	76.23	70-73	73	-	-		
45	CV-50	-	-	402	-18.701	164.304	113.8211	90.0000	6.524	0.101	92.13	80-88	85	-	-		
46	CV-50	-	-	725	+34.991	497.559	70.3244	90.0000	4.114	0.084	107.34	100-105	105	-	-		
200	CV-305	13+210	C2C	366	-11.6509	98	118.8867	70	6.8838	0.108	90.66	50	50	N/A	N/A	C/C	con 60 gira pero pisa la línea
201	CV-305	13+400	C2C	540	-10.9469	116	94.3698	70	5.2511	0.087	97.81	55-57	57	N/A	N/A	C/C	no recupera control desde curva anterior
202	CV-305	13+500	C2C	172	+32.0646	110	291.4964	70	7.0000	0.121	64.59	55	55	N/A	N/A	C/C	-
203	CV-305	13+600	C2C	277	-15.7638	92	171.9457	70	7.0000	0.115	80.67	57	57	N/A	N/A	C/C	-
204	CV-305	13+970	C2C	685	-7.4012	115	64.5645	80	4.3167	0.065	97.01	77	77	N/A	N/A	D/C	-
205	CV-305	14+100	C2C	270	-24.7989	135	183.9612	80	7.0000	0.120	80.72	72	72	N/A	N/A	D/C	-
206	CV-305	14+240	C2C	350	+9.3519	72	129.4164	80	7.0000	0.113	90.19	65-67	67	N/A	N/A	D/C	-
207	CV-305	14+350	C2C	258	-15.9914	85	188.5450	80	7.0000	0.107	76.15	65	65	N/A	N/A	D/C	-
208	CV-305	14+500	C2C	236	+34.9237	154	226.1705	80	7.0000	0.112	73.86	65-67	65	N/A	N/A	D/C	-
209	CV-305	14+700	C2C	295	+23.3554	132	176.7919	80	7.0000	0.110	82.12	70	70	N/A	N/A	C/C	-
210	CV-305	14+850	C2C	240	-27.5658	169	163.5398	80	7.0000	0.110	74.07	73	73	N/A	N/A	C/C	-
211	CV-305	15+120	C2C	181	+33.1074	96	346.3086	60	7.0000	0.117	65.56	55	55	N/A	N/A	C/C	-
212	CV-305	15+240	C2C	182	-28.5071	96	296.8996	60	7.0000	0.116	65.57	55	55	N/A	N/A	C/C	-
213	CV-305	15+400	C2C	198	+29.4541	109	271.4114	60	7.0000	0.131	71.09	55	55	N/A	N/A	C/C	-
214	CV-305	15+500	C2C	306	-11.1281	68	163.2861	60	7.0000	0.110	83.64	55	55	N/A	N/A	C/C	-
215	CV-305	15+600	C2C	181	+25.4586	96	266.3001	60	7.0000	0.117	65.56	50	50	N/A	N/A	C/C	-
216	CV-305	15+800	C2C	174	-63.8803	206	309.8190	60	7.0000	0.122	65.14	50	50	N/A	N/A	C/C	-
217	CV-305	16+000	C2C	246	+17.5662	99	177.7150	60	7.0000	0.093	71.36	57	57	N/A	N/A	C/C	-
218	CV-305	16+500	C2C	624	+11.1849	140	79.9080	80	4.6674	0.084	101.76	75-80	80	N/A	N/A	C/C	-
219	CV-305	17+650	C2C	229	+19.7218	93	212.0624	40	7.0000	0.105	71.34	55	55	N/A	N/A	D/C	-
47	CV-35	02+705	A	716	-19.469	315	61.9003	80	7.948	0.085	122.29	90	100	N/A	N/A	D/D	-
48	CV-35	04+487	A	681	-10.022	272	36.8465	80	8.000	0.074	115.40	90	100	N/A	N/A	D/D	-
49	CV-35	05+353	A	477	+22.605	250	90.4200	120	8.000	0.098	103.87	105	105	N/A	N/A	D/D	-
50	CV-35	05+808	A	602	+19.506	316	61.7265	120	8.000	0.087	112.96	120-127	127	N/A	N/A	D/D	-
51	CV-35	09+597	A	1503	+10.575	347	30.4756	120	4.768	0.045	133.01	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
52	CV-35	10+347	A	1517	-19.762	582	33.9562	120	4.735	0.044	132.65	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
53	CV-35	11+096	A	3858	-4.213	313	13.4588	120	2.373	0.017	141.27	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
54	CV-35	12+127	A	1782	+21.401	789	27.1243	120	4.184	0.038	134.41	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
55	CV-35	12+934	A	2711	+7.612	451	16.8777	120	3.049	0.025	138.22	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
56	CV-35	13+824	A	1797	-5.902	229	25.7743	120	4.156	0.038	134.77	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
57	CV-35	14+881	A	2384	-5.851	297	19.6987	120	3.354	0.028	136.50	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
58	CV-35	15+706	A	3027	-4.432	252	17.5878	120	2.814	0.022	138.84	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
59	CV-35	16+572	A	881	+11.801	283	41.7005	120	7.067	0.022	127.66	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
60	CV-35	17+888	A	1842	+26.049	818	31.8449	120	4.079	0.037	134.89	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
61	CV-35	18+259	A	842	+25.015	436	57.3748	120	7.276	0.058	118.27	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
62	CV-35	19+104	A	902	-21.619	365	59.2299	120	6.957	0.065	122.15	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
63	CV-35	19+535	A	582	-16.699	257	64.9780	120	8.000	0.091	112.45	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
64	CV-35	19+993	A	1975	+8.563	307	27.8919	120	3.867	0.034	135.02	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
65	CV-35	20+575	A	1000	-27.36	559	48.9437	120	6.472	0.059	125.38	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
66	CV-35	21+213	A	1459	-11.146	451	24.7148	120	4.894	0.046	132.36	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
67	CV-35	21+935	A	1469	-18.222	533	34.1867	120	4.854	0.046	132.79	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
68	CV-35	22+544	A	685	+69.668	800	87.1005	120	8.000	0.074	115.73	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
69	CV-35	23+850	A	833	+47.284	628	75.2923	120	7.329	0.068	122.24	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
70	CV-35	24+100	A	655	-89.706	944	96.0454	120	8.000	0.077	114.32	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
71	CV-35	25+233	A	904	+35.63	608	58.6027	120	6.944	0.073	127.51	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-
72	CV-35	25+233	A	1936	-10.198	273	37.9568	120	3.927	0.035	135.12	120-125	125	N/A	N/A	D/D	-

ANEXO II: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS

Salida	Longitud (m)	Orientación	Controla	Entrada	Longitud (m)	Orientación	Controla
1	14.95	Izquierda	NO	1	25.60	Recta	SI
2	23.70	Recta	NO	2	18.30	Recta	SI
3	37.26	Derecha	SI	3	50.86	Recta	SI
4	22.33	Recta	NO	4	45.35	Recta	SI
5	26.50	Recta	SI	5	33.25	Recta	SI
6	34.20	Recta	SI	6	32.88	Derecha	SI
7	19.01	Recta	SI	7	36.79	Recta	SI
8	23.82	Recta	SI	8	29.65	Recta	SI
9	29.81	Recta	SI	9	15.90	Derecha	SI
10	36.94	Recta	SI	10	41.00	Izquierda	SI
11	34.27	Recta	SI	11	49.43	Izquierda	SI
12	45.00	Derecha	SI	12	32.01	Derecha	NO
13	33.18	Recta	SI	13	20.60	Derecha	NO
14	23.31	Recta	SI	14	29.04	Recta	SI
15	36.36	Recta	SI	15	23.20	Derecha	SI
16	17.26	Izquierda	SI	16	27.57	Recta	SI
17	37.76	Izquierda	SI	17	43.89	Recta	SI
18	26.38	Derecha	SI	18	40.28	Recta	SI
19	40.16	Derecha	NO	19	30.62	Recta	SI
20	29.40	Recta	SI	20	64.67	Recta	SI
21	33.62	Recta	NO	21	33.85	Recta	SI
22	20.51	Recta	SI	22	31.00	Recta	NO
23	29.44	Recta	NO	23	28.70	Recta	NO
24	40.00	Recta	NO	24	24.54	Recta	SI
25	38.85	Recta	NO	25	19.50	Recta	NO
26	25.40	Derecha	NO	26	16.21	Derecha	SI
27	36.30	Recta	NO	27	22.92	Derecha	SI
28	11.15	Recta	SI	28	11.15	Recta	SI
29	42.30	Recta	NO	29	11.30	Izquierda	SI
30	60.30	Recta	NO	30	23.15	Izquierda	NO
31	57.30	Recta	NO	31	35.30	Izquierda	NO
32	44.33	Izquierda	NO	32	51.40	Recta	NO
33	45.00	Recta	NO	33	50.40	Derecha	NO
34	50.35	Recta	NO	34	42.80	Recta	NO
35	39.65	Recta	NO	35	53.50	Derecha	NO
36	37.75	Izquierda	NO	36	46.60	Recta	NO



37	39.90	Derecha	NO	37	38.40	Derecha	NO
38	41.80	Izquierda	NO	38	68.40	Recta	NO
39	46.50	Derecha	NO	39	79.80	Recta	NO
40	37.60	Izquierda	NO	40	55.25	Derecha	NO
41	48.70	Recta	NO	41	64.30	Recta	NO
42	35.45	Derecha	NO				
43	38.35	Recta	NO				
44	39.05	Derecha	NO				

Longitudes de las salidas y entradas observadas, y si el vehículo semiautónomo pudo controlar o no en esta.



ANEXO III: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS ACUERDOS CONVEXOS

#	Longitud real de acuerdo (m)	Kv real	Distancia de visibilidad norma 3.1 IC (m)	Distancia de visibilidad de POV conductor (h1=1.18; h2=0.50) (m)	Distancia de visibilidad de POV conductor (h1=1.18; h2=0) (m)	Distancia de visibilidad de POV camaras de guiado (h1=1.38; h2=0) (m)	Distancia de visibilidad de POV de radar (h1=0.32; h2=0.50) (m)
1	84.22	10631.53	256.05	261.51	158.40	171.30	185.60
2	137.86	1980.12	110.50	112.86	68.36	73.93	80.10
3	225.93	10240.48	251.29	256.65	155.46	168.12	182.15
4	69.24	1268.69	88.45	90.34	54.72	59.17	64.11
5	42.36	1586.67	98.92	101.03	61.19	66.18	71.70
6	225.42	8283.91	226.01	230.84	139.82	151.21	163.83
7	47.79	955.61	76.76	78.40	47.49	51.36	55.64
8	30.80	1205.45	86.22	88.06	53.34	57.68	62.50
9	290.63	5619.72	186.16	190.13	115.16	124.54	134.94
10	150.00	3456.66	146.00	149.11	90.32	97.67	105.83
11	150.00	3792.05	152.92	156.18	94.60	102.30	110.84
12	98.38	1040.37	80.10	81.81	49.55	53.59	58.06
13	102.66	3030.71	136.71	139.62	84.57	91.46	99.09
14	150.00	6146.44	194.68	198.84	120.44	130.25	141.12
15	100.44	6122.68	194.31	198.45	120.21	129.99	140.85
16	109.43	6799.06	204.76	209.13	126.67	136.99	148.42
17	43.16	4311.19	163.05	166.53	100.87	109.08	118.19
18	150.00	2641.01	127.62	130.34	78.95	85.38	92.50
19	198.44	9314.55	239.66	244.78	148.26	160.34	173.72
20	190.05	3706.74	151.19	154.41	93.53	101.15	109.59
21	191.10	3969.16	156.45	159.79	96.78	104.67	113.40
22	152.82	5753.58	188.36	192.38	116.53	126.02	136.53
23	60.45	7093.21	209.14	213.60	129.38	139.92	151.60
24	112.53	3574.14	148.46	151.63	91.84	99.32	107.61

Características geométricas y resultado de los cálculos de las distancias de visibilidades para cada caso.

Velocidad	Ft	Tp=2 s	Tp=1.5 s	Tp=1 s	Tp=0.5 s	Tp=0.2 s	Tp=0 s	inclinación %
50	0.411	2	1.5	1	0.5	0.2	0	0
60	0.390	2	1.5	1	0.5	0.2	0	0
70	0.369	2	1.5	1	0.5	0.2	0	0
80	0.348	2	1.5	1	0.5	0.2	0	0
90	0.334	2	1.5	1	0.5	0.2	0	0
100	0.320	2	1.5	1	0.5	0.2	0	0
110	0.306	2	1.5	1	0.5	0.2	0	0
120	0.291	2	1.5	1	0.5	0.2	0	0
130	0.277	2	1.5	1	0.5	0.2	0	0
140	0.263	2	1.5	1	0.5	0.2	0	0

Velocidades y tiempos de percepción y reacción utilizados para los cálculos.



Distancia de parada, $T_p=2$ s	Distancia de parada, $T_p=1.5$ s	Distancia de parada, $T_p=1$ s	Distancia de parada, $T_p=0.5$ s	Distancia de parada, $T_p=0.2$ s	Distancia de parada, $T_p=0$ s
51.73	44.78	37.84	30.89	26.73	23.95
69.67	61.34	53.01	44.67	39.67	36.34
91.17	81.45	71.72	62.00	56.17	52.28
116.85	105.74	94.63	83.52	76.85	72.40
145.48	132.98	120.48	107.98	100.48	95.48
178.59	164.70	150.81	136.92	128.59	123.03
216.79	201.51	186.23	170.96	161.79	155.68
261.49	244.82	228.15	211.49	201.49	194.82
312.42	294.37	276.31	258.26	247.42	240.20
371.18	351.74	332.29	312.85	301.18	293.40

Resultados obtenidos de los cálculos de distancias de visibilidad para los distintos casos.

Kv	Dvp; $T_p=2$ s	Dvr	Dvr; $T_p=1.5$ s	Dvr; $T_p=1$ s	Dvr; $T_p=0.5$ s	Dvr; $T_p=0$ s
1000	80	58	70	62	52	43
2000	111	80	99	89	78	68
3000	137	99	124	113	100	90
4000	159	115	145	133	119	108
5000	177	128	162	150	135	124
6000	194	140	178	165	150	138
7000	208	150	192	178	163	150
8000	224	162	208	193	178	163
9000	235	170	220	204	188	172
10000	249	180	234	217	200	183
11000	262	190	247	230	211	194

Cálculo de la diferencia entre la distancia de visibilidad obtenida por la norma para distintos tiempos y la distancia de visibilidad del radar.

Dvr - Dvp; Tp=2 s	Dvr - Dvp; Tp=1.5 s	Dvr - Dvp; Tp=1 s	Dvr - Dvp; Tp=0.5 s	Dvr - Dvp; Tp=0 s
-22	-12	-4	6	15
-31	-19	-9	2	12
-38	-25	-14	-1	9
-44	-30	-18	-4	7
-49	-34	-22	-7	4
-54	-38	-25	-10	2
-58	-42	-28	-13	0
-62	-46	-31	-16	-1
-65	-50	-34	-18	-2
-69	-54	-37	-20	-3
-72	-57	-40	-21	-4

Resultados de la diferencia entre la distancia de visibilidad obtenida por la norma para distintos tiempos y la distancia de visibilidad del radar.