

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN



UNIVERSITAS
Miguel Hernández

"MECANISMOS DE CONTROL DE REDUNDANCIA
EN PERCEPCIÓN COOPERATIVA PARA EL
VEHÍCULO AUTÓNOMO CONECTADO"

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre – 2021

AUTOR: Jose Antonio Cañas Palencia

DIRECTOR/ES: Miguel Sepulcre Ribes



RESUMEN

Los vehículos autónomos utilizan sensores a bordo para percibir el entorno. La capacidad de percepción de los sensores se reduce ante la presencia de obstáculos (incluidos otros vehículos) o condiciones climáticas adversas. Los vehículos pueden mejorar su percepción utilizando comunicaciones inalámbricas para intercambiar datos sobre los objetos detectados con vehículos e infraestructura cercanos. Esto se conoce como percepción cooperativa. Estudios anteriores han demostrado que la percepción cooperativa puede mejorar las capacidades de percepción de los vehículos incluso más allá del rango de detección de sus sensores. Sin embargo, dichos estudios mostraron también que el intercambio de información sobre los objetos detectados siguiendo los estándares actuales da como resultado una redundancia significativa, de forma que cada vehículo puede recibir información sobre un mismo objeto múltiples veces, transmitida por los vehículos cercanos. Esta redundancia puede ser positiva para confirmar la detección precisa de objetos o vehículos. Sin embargo, una redundancia excesiva puede sobrecargar el canal de comunicaciones V2X y comprometer la escalabilidad de la red. También puede afectar negativamente la precisión de la percepción si un canal sobrecargado da como resultado colisiones de paquetes. Estas colisiones pueden reducir la probabilidad de recibir mensajes CPM y, en última instancia, afectar la eficacia de la percepción colectiva o la detección cooperativa. En este trabajo de fin de grado se implementarán y evaluarán diferentes mecanismos que tratan de controlar y reducir la redundancia de información en percepción cooperativa. Se tomará como punto de partida los mecanismos propuestos en el proceso de estandarización de ETSI, y se estudiará su configuración óptima y cómo podrían funcionar en escenarios mixtos.

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS	8
1. INTRODUCCIÓN	4
2. ESTADO DEL ARTE	7
3. PERCEPCIÓN COOPERATIVA	11
3.1. FORMATO DEL CPM.....	11
3.2. REGLAS DE GENERACIÓN DE MENSAJES.....	12
3.3. TÉCNICAS DE MITIGACIÓN DE REDUNDANCIA.....	14
3.3.1. TÉCNICA BASADA EN LA DINÁMICA VEHICULAR	14
3.3.2. TÉCNICA BASADA EN DISTANCIA	16
3.3.3. TÉCNICA BASADA EN FRECUENCIA	18
3.3.4. TÉCNICA BASADA EN AUTO ANUNCIO	20
4. ENTORNO DE SIMULACIÓN NS-3	23
4.1. EXPLICACIÓN DEL CÓDIGO DE NS-3	24
4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LAS CUATRO TÉCNICAS	27
4.2.1. CÓDIGO TÉCNICA DINÁMICA VEHICULAR	27
4.2.2. CÓDIGO TÉCNICA DISTANCIA	28
4.2.3. CÓDIGO TÉCNICA FRECUENCIA	28
4.2.4. CÓDIGO TÉCNICA AUTO ANUNCIO	29
5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	30
5.1. PARÁMETROS DEL ESCENARIO	30
5.2. RENDIMIENTO SIN MITIGACIÓN DE REDUNDANCIA	30
5.3. ESTUDIO DE TÉCNICAS INDIVIDUALES.....	35
5.3.1. TÉCNICA BASADA EN LA DINÁMICA VEHICULAR	35
5.3.2. TÉCNICA BASADA EN DISTANCIA	40
5.3.3. TÉCNICA BASADA EN FRECUENCIA	51
5.3.4. TÉCNICA BASADA EN AUTO ANUNCIO	62
5.3.5. DISCUSIÓN	74
5.4. ESTUDIO EN ESCENARIO MIXTO.....	77
5.4.1. ESCENARIO MIXTO CON CUATRO TÉCNICAS AL 25%	79
5.4.2. ESCENARIO MIXTO CON DOS TÉCNICAS AL 50%	83
5.4.3. DISCUSIÓN	94
6. CONCLUSIONES	96
7. BIBLIOGRAFÍA	98

LISTA DE FIGURAS

Figura I. Situaciones críticas donde la eficiencia y seguridad pueden verse comprometidas.....	4
Figura 1. Estructura General de un CPM [7].....	11
Figura 2. Pseudocódigo de las Reglas de Generación de CPM de ETSI	13
Figura 3. Posición de los vehículos en la vía	15
Figura 4. Pseudocódigo de la técnica de Redundancia basada en la Dinámica vehicular	16
Figura 5. Pseudocódigo de la técnica de Redundancia basada en Distancia.....	18
Figura 6. Pseudocódigo de la técnica de Redundancia basada en Frecuencia	20
Figura 7. Pseudocódigo de la técnica de Redundancia basada en Auto anuncio	22
Figura 8. Bloques de ns-3.....	24
Figura 9. Creación de los nodos de la Red	25
Figura 10. Configuración de la capa física y canal.....	25
Figura 11. Configuración de la capa MAC y estándar 802.11p	26
Figura 12. Asignación de la densidad de tráfico en el escenario	26
Figura 13. Configuración del tráfico generado para cada nodo (vehículo).....	27
Figura 14. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM sin mitigación de redundancia.....	31
Figura 15. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo sin mitigación de redundancia.....	32
Figura 16. Ratio de entrega de paquetes sin mitigación de redundancia (PDR)	33
Figura 17. Ratio de percepción de objetos sin mitigación de redundancia	34
Figura 18. Redundancia del objeto detectado sin mitigación de redundancia	35
Figura 19. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM para la propuesta de 1m y de 4m	36
Figura 20. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo para la propuesta de 1m y de 4m.....	37
Figura 21. Ratio de entrega de paquetes para la propuesta de 1m y de 4m (PDR)	38
Figura 22. Ratio de percepción de objetos para la propuesta de 1m y de 4m	39
Figura 23. Redundancia del objeto detectado para la propuesta de 1m y de 4m	40
Figura 24. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con $W_Redundancy$ 0.1 s.....	41
Figura 25. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con $W_Redundancy$ 0.2 s.....	41
Figura 26. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con $W_Redundancy$ 0.3 s.....	42
Figura 27. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con $W_Redundancy$ 0.1 s	43
Figura 28. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con $W_Redundancy$ 0.2 s	43
Figura 29. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con $W_Redundancy$ 0.3 s	44
Figura 30. Ratio de entrega de paquetes con $W_Redundancy$ 0.1 s (PDR).....	45
Figura 31. Ratio de entrega de paquetes con $W_Redundancy$ 0.2 s (PDR).....	46
Figura 32. Ratio de entrega de paquetes con $W_Redundancy$ 0.3 s (PDR).....	46
Figura 33. Ratio de percepción de objetos con $W_Redundancy$ 0.1 s.....	47
Figura 34. Ratio de percepción de objetos con $W_Redundancy$ 0.2 s.....	48
Figura 35. Ratio de percepción de objetos con $W_Redundancy$ 0.3 s.....	48

Figura 36. Redundancia del objeto detectado con W_Redundancy 0.1 s	49
Figura 37. Redundancia del objeto detectado con W_Redundancy 0.2 s	50
Figura 38. Redundancia del objeto detectado con W_Redundancy 0.3 s	50
Figura 39. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con W_Redundancy 0.1 s	52
Figura 40. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con W_Redundancy 0.2 s	52
Figura 41. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con W_Redundancy 0.3	53
Figura 42. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con W_Redundancy 0.1 s	54
Figura 43. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con W_Redundancy 0.1 s	54
Figura 44. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con W_Redundancy 0.3 s	55
Figura 45. Ratio de entrega de paquetes con W_Redundancy 0.1 s (PDR)	56
Figura 46. Ratio de entrega de paquetes con W_Redundancy 0.2 s (PDR)	57
Figura 47. Ratio de entrega de paquetes con W_Redundancy 0.3 s (PDR)	57
Figura 48. Ratio de percepción de objetos con W_Redundancy 0.1 s	58
Figura 49. Ratio de percepción de objetos con W_Redundancy 0.2 s	59
Figura 50. Ratio de percepción de objetos con W_Redundancy 0.3 s	59
Figura 51. Redundancia del objeto detectado con W_Redundancy 0.1 s	60
Figura 52. Redundancia del objeto detectado con W_Redundancy 0.2 s	61
Figura 53. Redundancia del objeto detectado con W_Redundancy 0.3 s	61
Figura 54. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con N1	63
Figura 55. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con N2	63
Figura 56. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con W_Redundancy 0.3 s	64
Figura 57. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con N1	65
Figura 58. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con N2	66
Figura 59. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con W_Redundancy 0.3 s	67
Figura 60. Ratio de entrega de paquetes con N1 (PDR)	68
Figura 61. Ratio de entrega de paquetes con N2 (PDR)	69
Figura 62. Ratio de entrega de paquetes con W_Redundancy 0.3 s (PDR)	69
Figura 63. Ratio de percepción de objetos con N1	70
Figura 64. Ratio de percepción de objetos con N2	71
Figura 65. Ratio de percepción de objetos con W_Redundancy 0.3 s	72
Figura 66. Redundancia del objeto detectado con N1	73
Figura 67. Redundancia del objeto detectado con N2	73
Figura 68. Redundancia del objeto detectado con W_Redundancy 0.3 s	74
Figura 69. Redundancia del objeto detectado para las cuatro técnicas	75
Figura 70. Ratio de percepción de objetos para las cuatro técnicas	77
Figura 71. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con cuatro técnicas simultáneas al 25% de vehículos cada una	79

Figura 72. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con cuatro técnicas simultáneas al 25% de vehículos cada una.....	80
Figura 73. Ratio de entrega de paquetes con cuatro técnicas simultáneas al 25% de vehículos cada una (PDR)	81
Figura 74. Redundancia del objeto detectado con cuatro técnicas simultáneas al 25% de vehículos cada una	82
Figura 75. Ratio de percepción de objetos con cuatro técnicas simultáneas al 25% de vehículos cada una	83
Figura 76. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia, R_Redundancy 150m, W_Redundancy 0.2s y N2.....	84
Figura 77. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia, R_Redundancy 150m, W_Redundancy 0.2s y N2.....	85
Figura 78. Ratio de entrega de paquetes en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia, R_Redundancy 150m, W_Redundancy 0.2s y N2.....	86
Figura 79. Redundancia del objeto detectado en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia, R_Redundancy 150m, W_Redundancy 0.2s y N2.....	87
Figura 80. Ratio de percepción de objetos en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia, R_Redundancy 150m, W_Redundancy 0.2s y N2.....	88
Figura 81. Ratio de percepción de objetos en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia con WF1 respecto a las técnicas de la Distancia y Frecuencia	89
Figura 82. Ratio de percepción de objetos en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia con WF2 respecto a las técnicas de la Distancia y Frecuencia	90
Figura 83. Ratio de percepción de objetos en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia con WF3 respecto a las técnicas de la Distancia y Frecuencia	91
Figura 84. Redundancia del objeto detectado en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia con WF1 respecto a las técnicas de la Distancia y Frecuencia	92
Figura 85. Redundancia del objeto detectado en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia con WF2 respecto a las técnicas de la Distancia y Frecuencia	93
Figura 86. Redundancia del objeto detectado en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia con WF3 respecto a las técnicas de la Distancia y Frecuencia	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Historial de CPMs recibidos técnica Dinámica vehicular	15
Tabla 2. Historial de CPMs recibidos técnica Distancia	17
Tabla 3. Historial de CPMs recibidos técnica Frecuencia	19
Tabla 4. Historial de CPMs recibidos técnica Auto anuncio	21
Tabla 5. Ratio de ocupación del canal sin mitigación de redundancia (CBR)	32
Tabla 6. Ratio de ocupación del canal para la técnica de la Dinámica vehicular (CBR)	37
Tabla 7. Ratio de ocupación del canal para la técnica de la Distancia (CBR)	44
Tabla 8. Ratio de ocupación del canal para la técnica de la Frecuencia (CBR)	55
Tabla 9. Ratio de ocupación del canal para la técnica del Auto anuncio (CBR). En la tabla n.a. significa “no analizado”	67
Tabla 10. CBR para las cuatro técnicas con baja y alta densidad de tráfico	76
Tabla 11. Ratio de ocupación del canal para las 4 técnicas combinadas al 25% cada una comparado con técnicas (CBR)	80
Tabla 12. CBR en escenario mixto con 50% de vehículos empleando la técnica basada en distancia y el resto basada en frecuencia.....	86

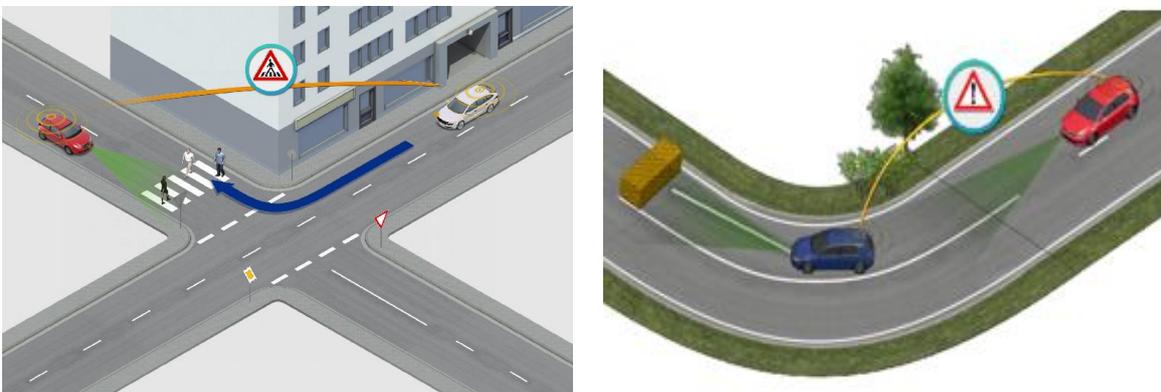


1. INTRODUCCIÓN

Los CAV (*Connected and Automated Vehicles*) emplearán las comunicaciones V2X (*Vehicle-to-everything*) para extender sus capacidades de percepción gracias al intercambio de información sobre el entorno de conducción a través de las comunicaciones móviles o inalámbricas. Estas comunicaciones serán útiles para solventar las limitaciones de los sensores de los CAV, las cuales podrían dificultar el aumento de seguridad vial y la eficiencia en el tráfico [1][2]. Aunque los sensores (como lidars, radares y cámaras) han mejorado su rango de percepción en los últimos tiempos [3], las aptitudes de éstos a bordo de los CAV siguen presentando restricciones ante la presencia de obstáculos y condiciones climáticas desfavorables [4][5].

Para superar estos impedimentos se utilizan las comunicaciones V2X, que no solo permiten que los CAV reciban información de sus sensores, sino que también pueden recibir información sobre el entorno que han detectado distintos CAV o incluso nodos de infraestructura RSU (*Road Side UnCAV*). Gracias a ello, los CAV podrán disponer de información a una mayor distancia del rango de detección de sus sensores, debido al intercambio de información y, adaptarse así, con mayor facilidad a las diferentes condiciones de la vía y el tráfico. Este proceso es conocido como percepción cooperativa o percepción colectiva [6][7].

En la siguiente figura se muestra cómo la percepción cooperativa puede ayudar a la seguridad y la eficiencia de la conducción de los CAV. En ella, se observa como un vehículo está advirtiendo a otro sobre la detección de un obstáculo en la vía, anticipándole a éste, el entorno que se va a encontrar antes incluso de que pueda visualizarlo.



a) Pre detección de peatones en la vía

b) Pre detección de un obstáculo en la vía

Figura I. Situaciones críticas donde la eficiencia y seguridad pueden verse comprometidas

Hasta la fecha, las comunicaciones vehiculares V2X han estado basadas en el empleo de la tecnología de comunicaciones IEEE 802.11p. Esta tecnología es una variante de Wi-Fi específicamente diseñada para el entorno vehicular que opera en la banda de 5.9GHz y que permite la comunicación directa entre vehículos (V2V, *Vehicle-to-Vehicle*) y entre vehículos y elementos de infraestructura (V2I, *Vehicle-to-Infrastructure*). La percepción cooperativa hará uso de esta tecnología para el intercambio de información, o incluso otras tecnologías recientemente estandarizadas por el 3GPP como LTE-V2X o 5G NR V2X.

Debido al interés en el despliegue de CAV, ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) y SAE (*Society of Automotive Engineers*) están desarrollando nuevos estándares V2X para implementar la percepción cooperativa y que los CAV puedan intercambiar información sobre lo que detectan sus sensores. ETSI publicó un Informe Técnico en diciembre de 2019 [7] y desde febrero de 2021 hasta la actualidad está trabajando en la Especificación Técnica [8]. Sin embargo, hasta el momento SAE no ha hecho público su estándar sobre percepción cooperativa [6]. En [7], ETSI expuso el denominado CPS (*Cooperative Perception Service*) que es el encargado de generar, recibir y procesar los CPM (*Cooperative Perception Message*). A su vez, el servicio CPS incluye la definición del formato de CPM y las reglas de generación para decidir cómo y cuándo se debe generar un CPM.

Estas reglas se propusieron por primera vez en [9] y están basadas en el intercambio de datos sobre objetos (su posición, velocidad, tamaño, tipo de objeto, etc.) entre CAV. En ellas se propone que, cuando los sensores de un CAV detecten un objeto lo incluyan en un CPM en función de su dinámica, como podría ser su posición o velocidad. De esta forma, los objetos que tienen una mayor movilidad se incluyen en CPM con mayor frecuencia, con el objetivo de informar sobre ellos a los demás CAV de forma más continua. Sin embargo, algunos estudios realizados han observado una ineficiencia importante que limita la escalabilidad del sistema. Estos estudios observaron cómo diferentes CAV podían detectar un mismo objeto y transmitirlo, y por ello, generar información redundante o muy similar en cortos espacios de tiempo. La transmisión de información redundante podría no ser realmente útil (por ejemplo, porque los objetos recibidos prácticamente no se han desplazado entre dos recepciones consecutivas) o

incluso podría incrementar la incertidumbre sobre los objetos si la información que transmiten diferentes CAV presenta diferente retardo. Dicha información redundante podría llegar a saturar el canal y dejar a éste sin capacidad para la transmisión de mensajes. Asimismo, la recepción y decodificación de un gran número de CPM podría sobrecargar el procesador de la unidad de comunicaciones embarcada de forma innecesaria si la información es redundante. Para abordar este problema, se propusieron diferentes técnicas de mitigación (o control) de redundancia en el Informe Técnico de ETSI sobre percepción cooperativa [7]. Su objetivo es el de reducir la carga en el canal radio, pero manteniendo las capacidades de percepción de los CAV llegando a generar un equilibrio entre ambas partes. En general, estas técnicas analizan los CPM recibidos para identificar aquellos objetos que no deben transmitirse por ser considerados redundantes. Se diferencian en la métrica o parámetro utilizado para considerar un objeto como redundante. Hasta la fecha, ningún estudio ha comparado las diferentes técnicas propuestas en dicho Informe Técnico del ETSI.

En este Trabajo de Fin de Grado se pretenden implementar y evaluar cuatro de las técnicas de mitigación de redundancia definidas por ETSI en [7] para comparar su rendimiento y mostrar las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas. El estudio no solo las evalúa de forma individual, sino también considerando escenarios mixtos, en los que no todos los CAV utilizan la misma técnica de mitigación de redundancia. Estas técnicas se han implementado y evaluado con el simulador de redes ns-3 (*Network Simulator-3*), cuyos resultados han sido procesados mediante MATLAB.

2. ESTADO DEL ARTE

El objetivo de la Percepción Cooperativa es que mejore la seguridad vial y la eficiencia del tráfico a través del intercambio de datos entre CAV. Determinados estudios han sugerido y evaluado el intercambio de datos sin procesar [12]. No obstante, sería necesario un ancho de banda considerable, que requeriría de tecnologías inalámbricas que operan en el rango de frecuencia de 30-300 GHz en la banda de EHF (*Extremely High Frequency*) y, que poseen un alcance limitado.

Debido a esto, buena parte de los estudios realizados hasta el momento consideran el flujo de información de objetos detectados de forma abstracta. Günther en [13] presenta, además, intercambio de flujo de información sobre el CAV transmisor, como su posición, capacidades de sensor, como puede ser el identificador del sensor, su rango de detección, todo ello adherido con la información del objeto. Por ello, los CAVs receptores mejoran la percepción de la ubicación de objetos respecto al transmisor, lo que mejora la seguridad vial de la vía. En [14] se estudia la conveniencia de agregar información adicional, como puede ser la correlación y las derivadas de orden superior, como la aceleración, de los objetos detectados.

Hasta hoy, el CPM (*Cooperative Perception Message*) definido por ETSI es la solución más empleada para el intercambio de flujo de información entre CAV, e incluye algunas de las nociones planteadas en [13] y [14]. El CPM fue propuesto por primera vez por ETSI en [7] y su formato final se incluirá en la Especificación técnica TS 103 324 [8] de ETSI. En la última versión, un CPM incluye información sobre el transmisor, los objetos detectados, las capacidades de los sensores del CAV transmisor e información sobre los diferentes niveles de confianza del sensor y las áreas de espacio libre detectadas.

Otro aspecto que cabe destacar, son los diferentes estudios realizados para la definición de las reglas de generación de CPM que detallan su contenido, cómo y con qué frecuencia se debe generar uno. Estas reglas, son clave para beneficiarse de forma eficiente del ancho de banda del canal y no saturar éste y, a su vez, adquirir elevados niveles de percepción. Estudios iniciales como [15] valoraron si los CAM (*Cooperative Awareness Messages*) [16] eran quienes debían almacenar la información de percepción cooperativa utilizando las reglas de generación de CAM o si debía enviarse en mensajes separados. Esto podría suponer una mejora en la transmisión, debido a una menor carga dentro de éste. A pesar

de esto, al solo transmitir la información de percepción cooperativa de forma conjunta con los CAM, la información sobre los objetos detectados estaría limitada a los instantes de generación de los CAM.

Gran parte de los estudios realizados hasta la fecha utilizan en la definición de reglas de generación de mensajes los CPM que actúan de forma independiente respecto a los CAM. En [7] y [15] se evaluó la transmisión de CPMs utilizando una frecuencia constante para la generación de éstos e incluyendo todos los objetos detectados en cada CPM transmitido. No obstante, al transmitir tantos mensajes, se observó que esta situación no era eficaz, ya que producía altas cargas en el canal pudiendo incluso llegar a saturarlo. Para solucionarlo, las diferentes propuestas actuales se focalizan en la selección de los objetos que deben insertarse en cada CPM de una forma dinámica e individualizada. En el caso de que no se seleccione ningún objeto, el CPM no se transmitirá.

En el estudio realizado en [17] se plantea la introducción de un objeto en un CPM en función de la utilidad para los vehículos de su entorno, con la finalidad de eliminar objetos del CPM que carezcan de importancia para otros vehículos. En [18] se plantea una solución que consiste en incrementar o disminuir la frecuencia de generación de CPM conforme la prioridad de cada vehículo, lo que depende de que un vehículo esté detectando objetos que no hayan sido incluidos previamente en un CPM por vehículos cercanos. La finalidad es cubrir puntos ciegos del sensor transmitiendo los objetos detectados en esta región con una alta prioridad.

Las reglas de generación de CPM con una mayor aprobación hasta la fecha se basan en la selección dinámica de objetos detectados en función de su posición, velocidad, y aceleración. Con esta finalidad, el transmisor incluirá un objeto en un CPM si alguno de los tres parámetros anteriores ha cambiado respecto a la última vez que lo incluyó en un CPM. Estas reglas, fueron propuestas por primera vez en [9] y se han incluido en el Informe técnico [7] y la Especificación técnica de percepción cooperativa [8] de ETSI.

En el presente trabajo, nos referiremos a éstas como las reglas de generación de CPM de ETSI. Para su práctica se han estudiado modelos analíticos con diferentes tecnologías de acceso radio en [19], [20] y su rendimiento ha sido estimado llevando a cabo simulaciones

en [7], [21] y [22]. Los estudios analíticos en [19] y [20] suministran información sobre los logros en temas de percepción que los CAVs pueden conseguir con estas reglas. Demuestran que, en algunos escenarios, disminuir la frecuencia con la que se insertan objetos en el CPM puede generar mejores resultados, debido a la disminución de la carga del canal y la interferencia en éste. Los resultados de la simulación comprendidos en el informe técnico de ETSI [7] corroboran la conveniencia de estas reglas respecto a una frecuencia de generación de CPM constante en términos de percepción y eficiencia del ancho de banda. El objetivo del estudio en [21] se basa en identificar los beneficios de seguridad de la percepción cooperativa, demostrando que la seguridad vial crece de forma considerable con la percepción cooperativa. Además, se demuestra como con una tasa de penetración de la percepción cooperativa de tan solo el 25% disminuye el riesgo de accidentes a un nivel aceptable para el despliegue de CAVs equipados con sensores.

El estudio en [22] demostró la capacidad de la percepción cooperativa para mejorar la eficiencia de percepción de los CAVs, sin embargo, se establecieron dos incapacidades principales en las reglas de generación de CPM. En primer lugar, se comprobó cómo estas reglas generan una cantidad elevada de CPMs pequeños, reduciendo así el ancho de banda, ya que cada CPM incluye alrededor de 200 bytes de sobrecarga [10]. En ella se incluyen los encabezados del protocolo de las capas inferiores y el del CPM. Los autores abordaron este problema con la técnica llamada Look-Ahead [10]. Ésta está diseñada para ampliar las reglas de generación de CPM y, se basa en reunir los objetos detectados y generar CPMs de mayores dimensiones. El trabajo realizado en [10] expone que Look-Ahead puede disminuir la frecuencia de CPMs y aumentar el tamaño de éstos y, por ello, disminuir simultáneamente la saturación del canal, mejorar la percepción y la fiabilidad de las comunicaciones V2X.

El estudio en [22] también observó que un CAV puede recibir información redundante sobre un mismo objeto que estén detectando varios CAVs simultáneamente. Un adecuado nivel de redundancia podría conseguir mejorar las posibles pérdidas de paquetes debidas a la interferencia del canal o efectos de propagación. Sin embargo, un elevado nivel de redundancia podría no aumentar las capacidades de percepción de los CAV, e incluso saturar el canal de radio, tal y como se ha explicado anteriormente. Este problema está siendo abordado mediante las técnicas de mitigación de redundancia, las cuales son el

principal reclamo para la realización de este trabajo. En [11], los responsables plantean utilizar la técnica de mitigación de redundancia basada en la dinámica vehicular, demostrando que reduce la carga del canal hasta un 70% y alcanza altas percepciones sobre los 200 metros. Dicha técnica fue incluida por ETSI en [7], unida a otras técnicas de mitigación de redundancia basadas en: entropía; frecuencia; confianza; distancia; auto anuncio de objetos.

Se han realizado estudios y evaluaciones de algunas técnicas de mitigación de redundancia en [23], dejando patente que la reducción de la redundancia de objetos mejora algunas métricas de las comunicaciones V2X como puede ser la PDR (*Packet Delivery Ratio*). La inclusión de mitigación de la redundancia de [8] parece ser bien reconocida y, por ello, puede que la mayoría de las técnicas anteriormente mencionadas sean añadidas a la Especificación Técnica. A pesar de todo, aún es confuso saber qué técnica o técnicas se seleccionará para llevar a cabo estas comunicaciones, si los CAV podrán seleccionar la técnica de mitigación más favorable según las circunstancias del entorno o una combinación de éstas. Es innegable que las técnicas de mitigación de redundancia proporcionan beneficios en términos de percepción y en la carga del canal.

En este trabajo, se pretende dar algo de luz observando el comportamiento que representan cuatro de las técnicas incluidas por ETSI en [7], realizando diferentes simulaciones de forma individual para cada técnica y agrupando varias de éstas en un escenario mixto.

3. PERCEPCIÓN COOPERATIVA

El propósito principal de la Percepción Cooperativa no es otro que el de compartir información sobre el entorno de conducción entre CAVs y entre CAVs y nodos de infraestructura RSU para ayudar tanto en el ámbito de la seguridad vial como en el tráfico. Para poder llevarlo a cabo, es necesario un CPS, el cual se encuentra ubicado en la capa de servicios de la arquitectura de comunicaciones definida por ETSI y es el encargado de generar, recibir y procesar los CPM [7].

Sobre el CPS, cabe destacar varios aspectos definidos en su interior, los cuales serán explicados más en profundidad en los siguientes puntos, como son el formato del CPM y las reglas de generación de CPM.

3.1. FORMATO DEL CPM

Un CPM está compuesto por una cabecera PDU (*Protocol Data Unit*) [7] CAV común y cinco contenedores distintos como queda ilustrado en la figura 1.

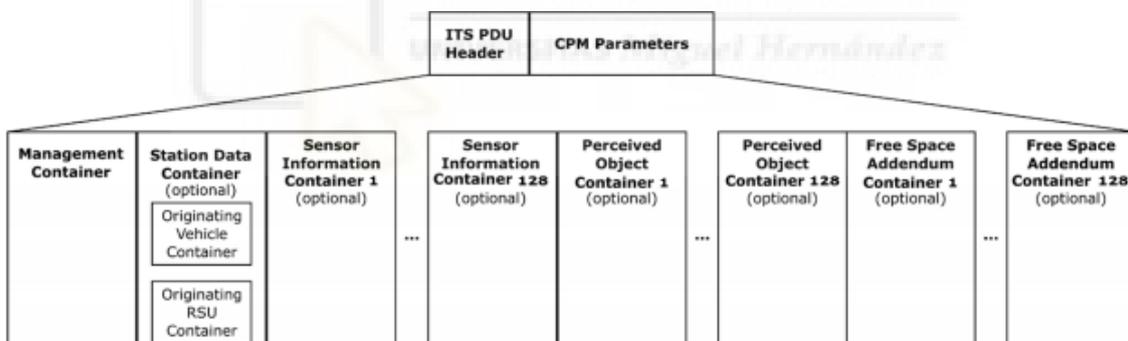


Figura 1. Estructura General de un CPM [7]

De izquierda a derecha, nos encontramos con un contenedor con información de gestión, un contenedor con datos del nodo transmisor, hasta 128 contenedores de información sobre los sensores del nodo transmisor, hasta 128 contenedores de objetos percibidos y hasta 128 contenedores con información sobre el espacio libre. El encabezado PDU CAV incluye información de la versión del protocolo, así como del identificador del mensaje y el de la estación. El contenedor de gestión es obligatorio y se encarga del suministro de información básica sobre el CAV transmisor, ya se trate de un vehículo o estación tipo RSU. Este contenedor incluye el tipo de estación, posición y opcionalmente información sobre el segmento de mensaje actual.

El contenedor de datos de la estación es opcional y agrega información complementaria a la disponible en el contenedor de gestión sobre el vehículo transmisor o RSU. En el caso de los vehículos, incluye su posición en el sistema de coordenadas, el ángulo de orientación, las dimensiones y la velocidad.

El contenedor de información del sensor es opcional, y en caso de que se precisara de éste se dispondría de uno por cada sensor. En él se incluye información como el tipo de sensor (por ejemplo, radar, lidar o un sistema de fusión de sensores combinada), el identificador del sensor y su rango de detección. Este contenedor dispone de una capacidad de alojamiento de hasta 128 sensores.

El contenedor de objetos percibidos también es opcional y si fuera necesario habrá uno por cada objeto, el cual se debe agregar al CPM. En él se especifica el estado dinámico y las propiedades de los objetos detectados. Para estos objetos se incluye información como el identificador del objeto; la diferencia de tiempo, entre el tiempo donde fue incluido por última vez en un CPM y el tiempo de detección actual del objeto; y algunos campos opcionales para dar una mayor perspectiva como son, la posición, velocidad, aceleración; y el tipo de objeto (vehículo, persona, etc). Este contenedor dispone de una capacidad de alojamiento igual que la del anterior, pero en este caso de 128 objetos detectados, en lugar de sensores.

En último lugar, nos encontramos el contenedor de espacio libre que es opcional y se emplea para indicar los diferentes niveles de confianza del sensor del transmisor dentro de su rango de alcance y las áreas de espacio libre detectadas.

3.2. REGLAS DE GENERACIÓN DE MENSAJES

Las reglas de generación de CPM definen cuándo un vehículo transmisor debe generar un CPM para la inserción de los objetos cercanos que detectó con el suficiente nivel de confianza, los cuales se incluirán en el contenedor de objetos percibidos del CPM. Estas reglas, junto con las técnicas de mitigación de redundancia son la clave para que se reduzca la carga en el canal radio, y se mantengan las capacidades de percepción de los sensores vehiculares llegando a generar un equilibrio entre ambas partes.

Las reglas de generación de CPM de ETSI [7], establecen que el tiempo mínimo transcurrido entre el inicio de dos eventos consecutivos para la generación de un CPM debe ser igual o mayor que T_{GenCpm} , situándose este entre 0.1 s y 1 s. Por lo tanto, un CAV generará como mínimo un CPM cada segundo, además, también se efectuará la generación si se detecta un objeto que no sea una persona o un animal y que cumple cualquiera de las siguientes condiciones:

1. La diferencia entre la posición actual del objeto y de su posición que tenía la última vez que fue incluido en un CPM es superior a 4 m.
2. La diferencia entre la velocidad actual del objeto y de la velocidad que tenía la última vez que se incluyó en un CPM es superior a 0,5 m/s.
3. La diferencia entre el tiempo actual de detección del objeto y el tiempo en el que se había incluido por última vez en un CPM es superior a 1 s.
4. Si un CAV detecta un objeto nuevo, lo incluirá inmediatamente en el CPM.

Para que las condiciones anteriores se entiendan de una forma más ordenada y concisa optaremos por el pseudocódigo, a continuación, se muestra éste para las reglas de generación de CPM de ETSI y en los próximos puntos para cada una de las cuatro técnicas implementadas en el presente documento.

ALGORITMO I. REGLAS DE GENERACIÓN CPM DE ETSI Ejecución: Para cada T_{GenCpm}
1. VAR 2. FLOTANTE vehicle_moved, vehiclespeeddifference, timedifer; 3. 4. INICIO 5. For cada objeto detectado do 6. If se detecta un nuevo objeto then 7. Incluye el objeto en el CPM actual 8. Else 9. Calcula vehicle_moved, vehiclespeeddifference y timedifer desde la última vez que fue incluido en un CPM 10. If vehicle_moved > 4m // vehiclespeeddifference > 0.5m/s // timedifer > 1s then 11. Incluye el objeto en el CPM actual 12. End If 13. End If 14. End For 15. FIN

Figura 2. Pseudocódigo de las Reglas de Generación de CPM de ETSI

3.3. TÉCNICAS DE MITIGACIÓN DE REDUNDANCIA

Las técnicas de mitigación de redundancia tratan de dar solución a las altas cargas que genera el canal cuando se transmiten CPMs con actualizaciones frecuentes e innecesarias sobre un mismo objeto. Estas cargas pueden ocasionar frecuentes pérdidas de CPMs y, al mismo tiempo disminuir el rendimiento del CPS. Para llevar a cabo la mitigación de redundancia, el CPS puede omitir objetos del CPM que cumplan las reglas de las técnicas de mitigación de redundancia. Por ello, se pretende dar unas nociones claras de las cuatro técnicas de mitigación de redundancia implementadas en este trabajo.

3.3.1. TÉCNICA BASADA EN LA DINÁMICA VEHICULAR

Esta técnica evita que un CAV transmita información sobre un objeto si dicho objeto no ha variado significativamente su posición o velocidad desde que un CAV recibió información sobre él. Para ello, en cada evento de generación de CPM, el CAV transmisor analiza el último CPM que ha recibido de todos los CAVs remotos. Esta regla de mitigación omitirá un objeto percibido del CPM si [7]:

- El objeto no se ha movido más de $P_Redundancy$ desde la última vez que se recibió información sobre él en un CPM. $P_Redundancy$ es el umbral de posición y ha de configurarse por debajo de los 4 m para ser compatible con las reglas de generación de CPMs anteriormente expuestas.
- La diferencia de velocidad del objeto no ha variado en más de $S_Redundancy$ (umbral de velocidad), siendo esta ≤ 0.5 m/s, desde la última vez que fue incluido en un CPM.

A continuación, procederemos a explicar con un ejemplo gráfico y trivial cómo funciona la técnica. En primer lugar, debemos tener en cuenta el escenario que albergamos, en él, $P_Redundancy$ tendrá un valor de 4 m y $S_Redundancy$ de 0.5 m/s. También dispondremos de tres vehículos que van a la misma velocidad, en este caso 5 m/s, y, están situados en las posiciones 0, 10 y 20 metros sobre el eje x como se muestra en la figura 3. Por otro lado, en la tabla X podemos observar los objetos que ha detectado cada CAV, en la primera y segunda fila el $ID\ CAV\ Tx\ 0$ genera un CPM en el que introduce la detección del $ID\ Objeto\ 1$ al detectarlo por primera vez y se lo envía al $ID\ CAV\ Rx\ 1$ y 2.

Desde la tercera fila hasta la sexta el *ID CAV Tx 1* genera un CPM en el que introduce la detección del *ID Objeto 0* y del *ID objeto 2* al detectarlos por primera vez y se lo envía a todos los destinatarios posibles, en este caso, al *ID CAV Rx 0* y 2. Por último, en las dos últimas filas el *ID CAV Tx 2* no generará un CPM, ya que el objeto detectado *ID Objeto 1*, se encontraba en la posición $x=10$ m y ahora se encuentra en $x=12$ m, por lo tanto, solo ha variado su posición en 2 m y tampoco ha variado su velocidad.

Una vez visto todo lo anterior, la técnica **omitirá el objeto** al ser $R_distance_difference$ (2 m) menor que $P_Redundancy$ (4 m) y $R_vehiclespeeddifference$ (0 m/s) menor que $S_Redundancy$ (0.5 m/s).

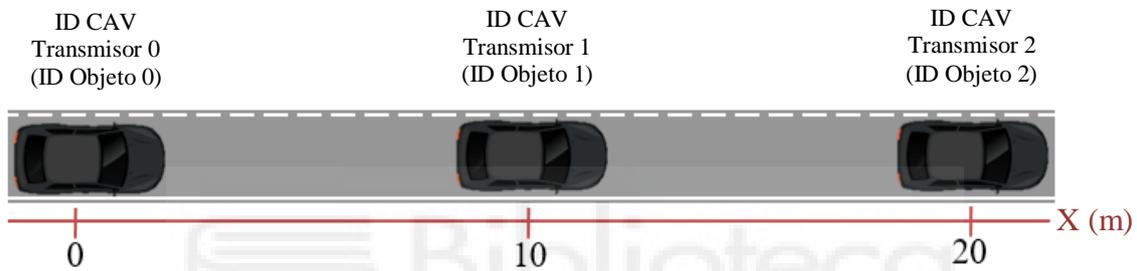


Figura 3. Posición de los vehículos en la vía

<i>ID CAV Receptor</i>	<i>ID CAV Transmisor</i>	<i>ID Objeto</i>	<i>Posición X del Objeto (m)</i>	<i>Velocidad del Objeto (m/s)</i>
1	0	1	10	5
2	0	1	10	5
0	1	0	0	5
0	1	2	0	5
2	1	0	20	5
2	1	2	20	5
0	2	1	12	5
1	2	1	12	5

Tabla 1. Historial de CPMs recibidos técnica Dinámica vehicular

A continuación, se muestra el pseudocódigo para la técnica de la Dinámica vehicular como habíamos comentado:

ALGORITMO II. MITIGACIÓN DE REDUNDANCIA BASADA EN LA DINÁMICA VEHICULAR	
Ejecución: Para cada T_GenCpm	
1.	VAR
2.	FLOTANTE vehicle_moved, vehiclespeeddifference, timedifer;
3.	FLOTANTE R_distance_difference, R_vehiclesspeeddifference;
4.	
5.	INICIO
6.	For cada objeto detectado do
7.	If se detecta un nuevo objeto then
8.	Incluye el objeto en el CPM actual
9.	Else
10.	Calcula vehicle_moved, vehiclespeeddifference y timedifer desde la última vez que fue incluido en un CPM
11.	If vehicle_moved > 4m // vehiclespeeddifference > 0.5m/s // timedifer > 1s then
12.	Incluye el objeto en el CPM actual
13.	End If
14.	End If
15.	End For
16.	For cada objeto (vehículo) detectado incluido en el CPM actual do
17.	Calcula R_distance_difference, R_vehiclesspeeddifference desde la última vez que fue incluido en un CPM
18.	If R_distance_difference < P_Redundancy // R_vehiclesspeeddifference < S_Redundancy then
19.	Elimina el objeto del CPM
20.	End If
21.	End For
22.	FIN

Figura 4. Pseudocódigo de la técnica de Redundancia basada en la Dinámica vehicular

3.3.2. TÉCNICA BASADA EN DISTANCIA

Esta técnica evita que un CAV transmita información sobre un objeto si éste se ha recibido por un CAV remoto que estaba a una distancia inferior a $R_Redundancy$ (umbral de distancia) y si se ha recibido en un tiempo inferior a $W_Redundancy$ (umbral longitud de ventana) ya que, si este había recibido dicha información también lo habrían hecho CAVs remotos. En cada evento de generación de CPM, el CAV transmisor analiza un historial de CPMs que ha recibido de forma remota por otros CAVs. Esta regla de mitigación omitirá un objeto percibido del CPM si [7]:

- Los sensores del CAV transmisor detectan un objeto, el cual busca en su lista de objetos recibidos y observa que el transmisor de dicho objeto estaba a una distancia euclídea menor que $R_Redundancy$ respecto a él mismo, por lo tanto, omite el objeto del CPM.

- La diferencia de tiempo con la que se va a incluir de nuevo un mismo objeto en un CPM es menor que $W_Redundancy$ (umbral longitud de ventana).

A continuación, procederemos a explicar con un ejemplo gráfico y trivial cómo funciona la técnica. En primer lugar, debemos tener en cuenta el escenario que albergamos, en él, $R_Redundancy$ tendrá un valor de 21 m y $W_Redundancy$ de 0.3 s. En este caso, también dispondremos de tres vehículos como en la técnica anterior y que van a una velocidad de 5 m/s, y, están situados en las posiciones 0, 10 y 20 metros sobre el eje x como se mostraba en la figura 3. Por otro lado, en la tabla 2 podemos observar los objetos que ha detectado cada CAV, en la primera y segunda fila el $ID\ CAV\ Tx\ 1$ genera un CPM en el que introduce la detección del $ID\ Objeto\ 2$ al detectarlo por primera vez y se lo envía al $ID\ CAV\ Rx\ 0$ y 2. En la tercera y cuarta el $ID\ CAV\ Tx\ 2$ genera un CPM en el que introduce la detección del $ID\ Objeto\ 1$ al detectarlo por primera vez y se lo envía al $ID\ CAV\ Rx\ 0$ y 1. Por último, en las dos últimas filas el $ID\ CAV\ Tx\ 0$ no generará un CPM, ya que al analizar su lista de CPMs recibidos observa que el $ID\ Objeto\ 1$ se lo había transmitido anteriormente el $ID\ CAV\ Tx\ 2$ que se encuentra a una distancia de 20m respecto a él mismo. A su vez, dicho objeto se está detectando 0.07 s después respecto a la última vez que el $ID\ CAV\ Rx\ 0$ recibió información sobre él.

Una vez visto todo lo anterior, la técnica **omitirá el objeto** al ser la $R_distance_difference_senders$ (20 m) menor que $R_Redundancy$ (21 m), y el $Time_difference$ (0.07 s) menor que $W_Redundancy$ (0.3 s). Esto se puede ver más en detalle en el punto 4.2. para la técnica basada en Distancia.

<i>ID CAV Receptor</i>	<i>ID CAV Transmisor</i>	<i>ID Objeto</i>	<i>Distancia euclídea entre CAVs remotos (m)</i>	<i>Tiempo de recepción (s)</i>
0	1	2	na	300.023
2	1	2	na	300.023
0	2	1	na	300.050
1	2	1	na	300.050
1	0	1	20	300.12
2	0	1	20	300.12

Tabla 2. Historial de CPMs recibidos técnica Distancia

A continuación, se muestra el pseudocódigo para la técnica de la Distancia como habíamos comentado:

ALGORITMO III. TÉCNICA DE MITIGACIÓN DE REDUNDANCIA BASADA EN DISTANCIA	
Ejecución: Para cada T_GenCpm	
1.	VAR
2.	FLOTANTE vehicle_moved, vehiclespeeddifference, timedifer;
3.	FLOTANTE R_distance_difference_senders, Time_difference;
4.	
5.	INICIO
6.	For cada objeto detectado do
7.	If se detecta un nuevo objeto then
8.	Incluye el objeto en el CPM actual
9.	Else
10.	Calcula vehicle_moved, vehiclespeeddifference y timedifer desde la última vez que fue incluido en un CPM
11.	If vehicle_moved > 4m // vehiclespeeddifference > 0.5m/s // timedifer > 1s then
12.	Incluye el objeto en el CPM actual
13.	End If
14.	End If
15.	End For
16.	For cada objeto detectado incluido en el CPM actual
17.	For cada CAV transmisor analiza su historial de CPMs recibidos por CAVs remotos do
18.	Calcula R_distance_difference_senders, Time_difference comparando con los datos del transmisor que le ha enviado ese objeto
19.	If R_distance_difference_senders < R_Redundancy && Time_difference < W_Redundancy then
20.	Elimina el objeto del CPM
21.	End If
22.	End For
23.	End For
24.	FIN

Figura 5. Pseudocódigo de la técnica de Redundancia basada en Distancia

3.3.3. TÉCNICA BASADA EN FRECUENCIA

Esta técnica evita que un CAV transmita información de un objeto en función del número de veces que haya recibido dicho objeto en su historial de CPMs. En cada evento de generación de CPM, el CAV transmisor analiza un historial de CPMs recibidos de forma remota por otros CAVs durante la ventana de tiempo reciente de longitud $W_Redundancy$. Esta regla de mitigación omitirá un objeto percibido del CPM si [7]:

- Los sensores del CAV transmisor detectan un objeto, el cual busca en su lista de objetos recibidos y observa que tiene dicho objeto con un número de repeticiones mayor que $N_Redundancy$ (umbral número de objetos), por lo tanto, omite el objeto del CPM.

A continuación, procederemos a explicar con un ejemplo gráfico y trivial cómo funciona la técnica. En primer lugar, debemos tener en cuenta el escenario que albergamos, en él, $N_Redundancy$ tendrá un valor de 1 y $W_Redundancy$ de 0.3 s. En este caso, también dispondremos de tres vehículos como en la técnica anterior y que van a una velocidad de 5 m/s, y, están situados en las posiciones 0, 10 y 20 metros sobre el eje x como se mostraba en la figura 3. Por otro lado, en la Tabla 3 podemos observar los objetos que ha detectado cada CAV, en la primera y segunda fila el $ID\ CAV\ Tx\ 0$ genera un CPM en el que introduce la detección del $ID\ Objeto\ 1$ al detectarlo por primera vez y se lo envía al $ID\ CAV\ Rx\ 1$ y 2. En la tercera, cuarta, quinta y sexta el $ID\ CAV\ Tx\ 1$ genera un CPM en el que introduce la detección del $ID\ Objeto\ 0$ y 2 al detectarlos por primera vez y se lo envía al $ID\ CAV\ Rx\ 0$ y 2. Por último, en la última fila el $ID\ CAV\ Tx\ 0$ no generará un CPM, ya que el $ID\ CAV\ Rx\ 2$ ya había recibido el $ID\ Objeto\ 1$ en la fila 2.

Una vez visto todo lo anterior, la técnica **omitirá el objeto** al ser $Object_count$ (1) mayor o igual que $N_Redundancy$ (1) y al recibirse este objeto 0,107 s después de la anterior recepción (fila 2) y por ello estar dentro del tiempo de ventana $W_Redundancy$ (0.3 s).

<i>ID CAV Receptor</i>	<i>ID CAV Transmisor</i>	<i>ID Objeto</i>	<i>Tiempo de recepción (s)</i>
1	0	1	300.023
2	0	1	300.023
0	1	0	300.077
0	1	2	300.077
2	1	0	300.077
2	1	2	300.077
2	0	1	300.13

Tabla 3. Historial de CPMs recibidos técnica Frecuencia

A continuación, se muestra el pseudocódigo para la técnica de la Frecuencia como habíamos comentado.

ALGORITMO IV. TÉCNICA DE MITIGACIÓN DE REDUNDANCIA BASADA EN FRECUENCIA	
Ejecución: Para cada T_GenCpm	
1.	VAR
2.	FLOTANTE vehicle_moved, vehiclespeeddifference, timedifer;
3.	FLOTANTE Object_count;
4.	INICIO
5.	For cada objeto detectado do
6.	If se detecta un nuevo objeto then
7.	Incluye el objeto en el CPM actual
8.	Else
9.	Calcula vehicle_moved, vehiclespeeddifference y timedifer desde la última vez que fue incluido en un CPM
10.	If vehicle_moved > 4m // vehiclespeeddifference > 0.5m/s // timedifer > 1s then
11.	Incluye el objeto en el CPM actual
12.	End If
13.	End If
14.	End For
15.	For cada objeto detectado incluido en el CPM actual
16.	For cada CAV-S transmisor analiza su historial de CPMs recibidos por CAVs remotos durante la ventana de tiempo de longitud reciente $W_Redundancy$ do
17.	Calcula Object_count mediante la cuenta del número de veces que el CAV transmisor había detectado un objeto
18.	If Object count $\geq N_Redundancy$ then
19.	Elimina el objeto del CPM
20.	End If
21.	End For
22.	End For
23.	FIN

Figura 6. Pseudocódigo de la técnica de Redundancia basada en Frecuencia

3.3.4. TÉCNICA BASADA EN AUTO ANUNCIO

Esta técnica evita que un CAV transmita información de un objeto si dicho objeto le ha enviado un CPM un número de veces mayor que cierto umbral, es decir, si es un CAV. Para llevar a cabo esta técnica vamos a utilizar dos variables que no vienen impuestas en [7], las cuales son $N_Redundancy$ (umbral número de objetos) y $W_Redundancy$ (umbral longitud de ventana).

Esta regla de mitigación omitirá un objeto percibido del CPM si [7]:

- Los sensores del CAV detectan un objeto, el cual busca en su lista de objetos recibidos y observa que ha recibido información de ese objeto cuando actuaba como transmisor, por lo que se puede asumir que otros CAVs receptores también recibieron esta información. Entonces, se elimina el objeto del CPM para no crear redundancia.

A continuación, procederemos a explicar con un ejemplo gráfico y trivial cómo funciona la técnica. En primer lugar, debemos tener en cuenta el escenario que albergamos, en él, $N_Redundancy$ tendrá un valor de 1 y $W_Redundancy$ de 0.3 s. En este caso, también dispondremos de tres vehículos como en la técnica anterior y que van a una velocidad de 5 m/s, y, están situados en las posiciones 0, 10 y 20 metros sobre el eje x como se mostraba en la figura 3. Por otro lado, en la Tabla 4 podemos observar los objetos que ha detectado cada CAV, en la primera y segunda fila el $ID\ CAV\ Tx\ 0$ genera un CPM en el que introduce la detección del $ID\ Objeto\ 1$ al detectarlo por primera vez y se lo envía al $ID\ CAV\ Rx\ 1$ y 2. En la tercera, cuarta, quinta y sexta el $ID\ CAV\ Tx\ 1$ genera un CPM en el que introduce la detección del $ID\ Objeto\ 0$ y 2 al detectarlo por primera vez y se lo envía al $ID\ CAV\ Rx\ 2$ y 0. Por último, en las dos últimas filas el $ID\ CAV\ Tx\ 2$ no generará un CPM, ya que el $ID\ Objeto\ 1$ que está detectando le había enviado información previamente a éste cuando actuaba como transmisor.

Una vez visto todo lo anterior, la técnica **omitirá el objeto** al ser $Sender_count$ (1) mayor o igual que $N_Redundancy$ (1) y al recibirse este objeto 0,043 s después de la anterior recepción (fila 4 y 6) y estar dentro del tiempo de ventana $W_Redundancy$ (0.3 s).

<i>ID CAV Receptor</i>	<i>ID CAV Transmisor</i>	<i>ID Objeto</i>	<i>Tiempo de recepción (s)</i>
1	0	1	300.023
2	0	1	300.023
0	1	0	300.077
2	1	0	300.077
0	1	2	300.077
2	1	2	300.077
0	2	1	300.12
1	2	1	300.12

Tabla 4. Historial de CPMs recibidos técnica Auto anuncio

A continuación, se muestra el pseudocódigo para la técnica del Auto Anuncio como habíamos comentado:

ALGORITMO V. TÉCNICA DE MITIGACIÓN DE REDUNDANCIA BASADA EN AUTO ANUNCIO	
Ejecución: Para cada T_GenCpm	
1.	VAR
2.	FLOTANTE vehicle_moved, vehiclespeeddifference, timedifer;
3.	FLOTANTE Sender_count;
4.	INICIO
5.	For cada objeto detectado do
6.	If se detecta un nuevo objeto then
7.	Incluye el objeto en el CPM actual
8.	Else
9.	Calcula vehicle_moved, vehiclespeeddifference y timedifer desde la última vez que fue incluido en un CPM
10.	If vehicle_moved > 4m // vehiclespeeddifference > 0.5m/s // timedifer > 1s then
11.	Incluye el objeto en el CPM actual
12.	End If
13.	End If
14.	End For
15.	For cada objeto detectado incluido en el CPM actual
16.	For cada CAV-S transmisor analiza su historial de CPMs recibidos por CAVs remotos durante la ventana de tiempo de longitud reciente $W_Redundancy$ do
17.	Calcula Sender_count mediante la suma del número de veces que el objeto detectado le ha enviado un CPM
18.	If Sender_count \geq $N_Redundancy$ then
19.	Elimina el objeto del CPM
20.	End If
21.	End For
22.	End For
23.	FIN

Figura 7. Pseudocódigo de la técnica de Redundancia basada en Auto anuncio

4. ENTORNO DE SIMULACIÓN NS-3

Para evaluar las técnicas de mitigación explicadas en el punto 3.3 se ha utilizado ns-3 que es un simulador de red de eventos discretos para sistemas de Internet, dirigido principalmente a la investigación y el uso educativo. Este es un software libre, de código abierto, licenciado bajo la licencia GNU GPLv2, y mantenido por una comunidad mundial [24].

El simulador ns-3 está diseñado como un conjunto de bibliotecas que pueden combinarse entre sí y también con otras bibliotecas de software externas. Si bien algunas plataformas de simulación también proporcionan a los usuarios un entorno de interfaz gráfica de usuario único e integrado en el que también se llevan a cabo todas las tareas. El simulador ns-3 es más modular en este sentido [25]. Los usuarios de ns-3 deben trabajar mediante línea de comandos. A su vez, ns-3 también dispone de una herramienta para depurar el código, lo que es muy útil para detectar errores que sin esto serían difíciles de detectar.

Los principales objetivos de ns-3 se basan en [25]:

- Ayudar a mejorar el rigor técnico de la práctica de simulación de redes.
- Construir y mantener un núcleo de simulación alineado también con las necesidades de la comunidad investigadora.

Modelos básicos en el simulador ns-3 [25]:

- Soporte para modelos de movilidad, lo que se utiliza en este trabajo para la detección de la posición en cada instante de tiempo de cada objeto e CAV.
- Utiliza dispositivos como Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), CSMA (*Carrier-Sense Multiple Access*), etc. Esto es recomendable para las comunicaciones vehiculares, las cuales se ejecutan mediante el estándar IEEE 802.11p (derivado del estándar 802.11, base de los productos comercializados como Wi-Fi) para agregar WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*), un sistema de comunicación vehicular [26].
- Aplicaciones como servidor de eco y generadores de tráfico, los cuales estos últimos nos sirven para poder crear el tráfico de una vía a nuestro parecer, siendo posible asignar para cada vehículo tanto su posición en el “eje x” como en el “eje

y” y su velocidad. En este trabajo se han utilizado archivos “. tcl” ya que cada uno de ellos tiene asignado una densidad de tráfico diferente, lo que ayudará posteriormente en las simulaciones del siguiente apartado.

El código se ha implementado de forma general mediante lenguaje C++, aunque en ciertas ocasiones se puede emplear C. Para ello se ha utilizado Eclipse, que es una plataforma de software compuesto por un conjunto de herramientas de programación de código abierto multiplataforma. En concreto, se ha empleado Eclipse para el desarrollo y evaluación local de las técnicas, y la línea de comandos para la ejecución de simulaciones a gran escala en un cluster de computación. Éste es un sistema potente, y, en él se pueden lanzar varias simulaciones con diferentes variables y en paralelo para que se ejecuten todas ellas lo más rápido posible. Se comprende por diferentes usuarios que mediante un “logging” pueden acceder a la información de cada una de sus cuentas.

4.1. EXPLICACIÓN DEL CÓDIGO DE NS-3

En este punto, se pretende explicar partes del código de ns-3 implementado mediante figuras, y dando detalles de cada línea de código mostrada. A continuación, se muestra una figura con los diferentes bloques para orientar al lector en la explicación de ellos.

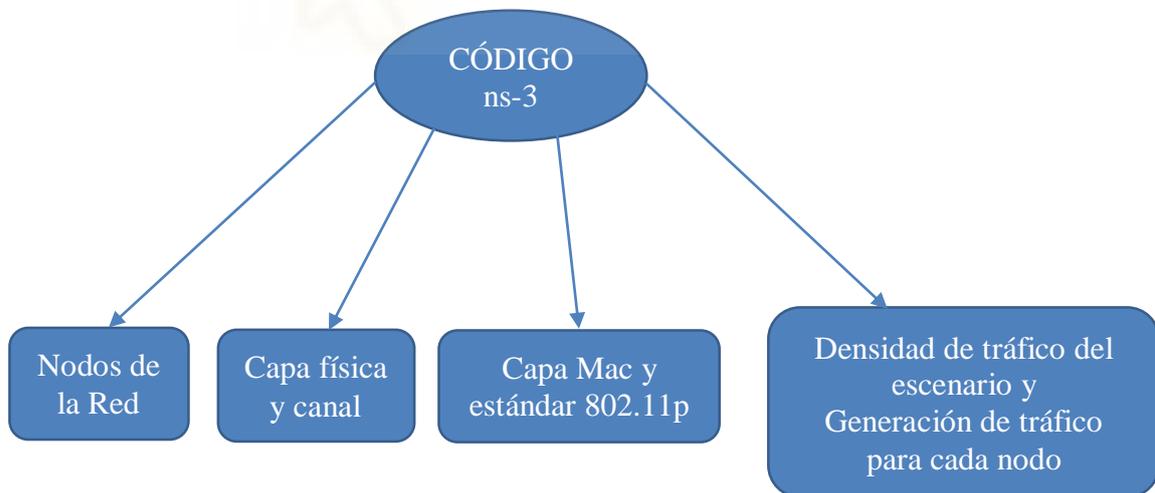


Figura 8. Bloques de ns-3

En la línea 3580 y en la 3581 de la Figura 9, podemos observar la creación de los nodos de la red [27], para la cual se crean tantos como vehículos haya.

```
3580 NodeContainer Nodes;  
3581 Nodes.Create(NumCars);
```

Figura 9. Creación de los nodos de la Red

A partir de la línea 3636 de la Figura 10, podemos observar la configuración de la capa física, donde se crea un *YansWifiPhyHelper DSRCPHY* [28] el cual facilita la creación y gestión de objetos para ésta.

De la 3637 hasta la 3642 se le asigna a la capa física, respectivamente, un modelo de error, que se utiliza para indicar que un paquete debe considerarse con errores; nivel de transmisión mínimo disponible en dBm; nivel de transmisión máximo disponible en dBm; pérdida en dB de la relación señal/ruido; umbral de energía en dBm que debe superar una señal recibida sin Wi-Fi para que la capa física declare el estado ocupado; umbral de energía en dBm que debe superar una señal recibida para permitir que la capa física la detecte.

A partir de 3644 hasta la 3651 de la misma figura, podemos observar la configuración del canal, en la que se crea un nuevo *YansWifiPhyHelper DSRCCChannel* para llevarla a cabo. Se le asigna al canal respectivamente, un modelo de pérdidas por propagación; un retardo entre fuente y destino; creación del canal; asignación del canal creado a la capa física;

```
3635 /*Configuration of PHY layer*/  
3636 YansWifiPhyHelper DSRCPHY = YansWifiPhyHelper::Default();  
3637 DSRCPHY.SetErrorRateModel("ns3::DSRCErrorRateModel");  
3638 DSRCPHY.Set("TxPowerStart", DoubleValue(23.0));  
3639 DSRCPHY.Set("TxPowerEnd", DoubleValue(23.0));  
3640 DSRCPHY.Set("RxNoiseFigure", DoubleValue(9));  
3641 DSRCPHY.Set("CcaModelThreshold", DoubleValue(-65));  
3642 DSRCPHY.Set("EnergyDetectionThreshold", DoubleValue(-85));  
3643  
3644 /*Configuration of CHANNEL*/  
3645 YansWifiChannelHelper DSRCCChannel;  
3646 DSRCCChannel.AddPropagationLoss("ns3::WINNERB1plusFreeWayPropagationLossModel",  
3647 "Frequency", DoubleValue(5.9e9), "StdShadowFading", DoubleValue(3.0));  
3648  
3649 DSRCCChannel.SetPropagationDelay("ns3::ConstantSpeedPropagationDelayModel");  
3650 Ptr<YansWifiChannel> channel = DSRCCChannel.Create();  
3651 DSRCPHY.SetChannel(channel);
```

Figura 10. Configuración de la capa física y canal

Por otro lado, a partir de la línea 3654 hasta la 3661 de la Figura 11, podemos observar la configuración de la capa MAC (Media Access Control), en la que se crea un *NqosWaveMacHelper DSRCMac* [29] para realizarla. Después, se puede asignar la capa MAC sin DCC o con DCC reactivo o adaptativo según convenga.

Por último, para terminar con la sección de configuraciones, faltaría asignar el estándar 802.11p [30] para las comunicaciones vehiculares y un *NetDeviceContainer* [31] para nuestro canal. En la línea 3662 se le asigna el estándar 802.11p por defecto, el cual modela un controlador de interfaz de red inalámbrica basado en el estándar IEEE 802.11, como podemos ver en la línea siguiente y, será el indicado para unificar todos los objetos que dispongan de Wi-Fi.

A su vez, en la 3664 podemos apreciar el objeto *NetDeviceContainer DSRCdevices*, el cual contiene un vector de punteros tipo *NetDevice*, este será el interfaz entre la capa de red e inferiores. Después, instalamos en cada uno de los nodos, en este caso vehículos, el *DSRCdevices*, indicando su capa física, capa MAC, y en qué nodos debe estar disponible, en este caso para los 840 vehículos disponibles en la simulación del escenario.

```
3653  /*Configuration of MAC layer*/
3654  NqosWaveMacHelper DSRCMac = NqosWaveMacHelper::Default();
3655  if (check_DCC == 0) //No DCC
3656  {
3657      DSRCMac.SetType("ns3::OcbWifiMac", "QosSupported", BooleanValue(false));
3658  } else //DCC Reactive or Adaptive
3659  {
3660      DSRCMac.SetType("ns3::OcbWifiMac", "QosSupported", BooleanValue(true));
3661  }
3662  Wifi80211pHelper DSRC = Wifi80211pHelper::Default();
3663  DSRC.SetStandard(WIFI_PHY_STANDARD_80211_10MHZ);
3664  NetDeviceContainer DSRCdevices;
3665  DSRCdevices = DSRC.Install(DSRCPhy, DSRCMac, Nodes);
```

Figura 11. Configuración de la capa MAC y estándar 802.11p

Por otro lado, a partir de la línea 3680 hasta la línea 3683 de la Figura 12, podemos observar la densidad de tráfico asignada al escenario mediante un objeto del tipo *Ns2MobilityHelper* [32], en este caso, alta densidad, ya que posee el archivo de *HIGH_DENSITY.tcl*, que se trata de una traza del simulador de tráfico SUMO con el que se puede realizar un control del flujo del tráfico.

```
3680  std::cout << "ns3 TCL file reading starts" << std::endl;
3681  Ns2MobilityHelper ns2 = Ns2MobilityHelper("scratch/HIGH_DENSITY.tcl");
3682  ns2.Install();
3683  std::cout << "ns3 TCL file reading ends" << std::endl;
```

Figura 12. Asignación de la densidad de tráfico en el escenario

En la línea 3769 de la Figura 13 definiremos un socket UDP llamado *tid* para utilizarlo posteriormente. A partir de la línea 3770 hasta la línea 3779, podemos observar un bucle for que recorre todos los dispositivos del escenario (vehículos), por cada uno de éstos se obtendrá un objeto de tipo *NetDevice*, llamado *device*. Después, obtendremos para cada vehículo el *wifiPhy* mediante el objeto *Ptr<WifiPhy>* [33] para que trabajen a la misma frecuencia de la capa física del canal y poder así asociarlos.

Por último, en la 3776, podemos observar la creación de un socket para el intercambio de información entre nodos, con el nodo actual y del tipo UDP al crearlo con *tid*. En la línea siguiente, se asocia este con el dispositivo, haciendo así posible la comunicación del vehículo dentro del canal.

```
3769   typeId tid = typeId::LookupByName("ns3::UdpSocketFactory");
3770   for (uint32_t n = 0; n < DsrcDevices.GetN(); ++n) {
3771       Ptr<NetDevice> device = DsrcDevices.Get(n)->GetObject<WifiNetDevice>();
3772       Ptr<Node> node = device->GetNode();
3773
3774       Ptr<WifiPhy> wifiPhy = DsrcDevices.Get(n)->GetObject<WifiNetDevice>()->GetPhy();
3775
3776       Ptr<Socket> DsrcSocket = Socket::CreateSocket(node, tid);
3777       DsrcSocket->BindToNetDevice(device);
3778   }
3779 }
```

Figura 13. Configuración del tráfico generado para cada nodo (vehículo)

4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LAS CUATRO TÉCNICAS

En los siguientes puntos vamos a explicar de una forma más ordenada y concisa el código implementado para las cuatro técnicas realizadas en el presente documento mediante una explicación teórica.

4.2.1. CÓDIGO TÉCNICA DINÁMICA VEHICULAR

Se ha implementado una función que recorre la matriz con los objetos que los sensores detectan una vez se ha efectuado la mitigación por parte de ETSI. Cuando se recorren esos objetos, se almacena su posición actual, su posición anterior de la última vez que fue incluido en un CPM, su velocidad actual y la que tenía la última vez que se incluyó en un CPM. Con estos valores se obtiene la *R_distance_difference* (diferencia entre la posición actual y la previa) y la *R_vehiclespeeddifference* (diferencia entre la velocidad actual y la previa) y se compara si son menores que los umbrales *P_Redundancy* y *S_Redundancy* respectivamente para proceder o no a la mitigación del objeto. Si ambos son menores, se eliminará el objeto del CPM.

4.2.2. CÓDIGO TÉCNICA DISTANCIA

Se ha implementado una función que recorre la matriz con los objetos que los sensores detectan una vez se ha efectuado la mitigación por parte de ETSI. Además, al disponer de una longitud de ventana, los vehículos solo analizarán su historial de CPMs con objetos que sean detectados dentro de ésta, eliminando así objetos muy antiguos y haciendo que el programa funcione de forma más fluida. Cuando un CAV transmisor detecta un objeto analiza su historial de CPMs recibidos mediante un condicional *if* para ver si había recibido ese objeto de otro CAV. Si ya había recibido ese objeto por medio de otro CAV transmisor, almacenará su posición actual en el *eje x* y en el *eje y* y la posición del CAV transmisor que le envió este objeto para obtener *R_distance_difference_Senders* (diferencia entre la posición del CAV transmisor y el que le envió el objeto detectado). También será necesario obtener *Time_difference* (diferencia entre el tiempo de detección actual del objeto y la última vez que fue incluido en un CPM). Ahora se compara si son menores que los umbrales *R_Redundancy* y *W_Redundancy* respectivamente para proceder o no a la mitigación del objeto. Si ambos son menores, se eliminará el objeto del CPM.

4.2.3. CÓDIGO TÉCNICA FRECUENCIA

Se ha implementado una función que recorre la matriz con los objetos que los sensores detectan una vez se ha efectuado la mitigación por parte de ETSI. Además, al disponer de una longitud de ventana, los vehículos solo analizarán su historial de CPMs con objetos que sean detectados dentro de ésta, eliminando así objetos muy antiguos y haciendo que el programa funcione de forma más fluida. Cuando un CAV transmisor detecta un objeto analiza su historial de CPMs recibidos mediante un condicional *if* para ver cuántas copias había recibido de ese objeto por medio de otros CAVs transmisores. Si lo había recibido, lo contará y almacenará ese valor en *Object_Count* (*número de veces que el CAV transmisor ha recibido un mismo objeto*) para finalmente comparar si dicho valor es mayor o igual que *N_Redundancy* para proceder o no a la mitigación del objeto. Si es mayor o igual, se eliminará el objeto del CPM.

4.2.4. CÓDIGO TÉCNICA AUTO ANUNCIO

Se ha implementado una función que recorre la matriz con los objetos que los sensores detectan una vez se ha efectuado la mitigación por parte de ETSI. Además, al disponer de una longitud de ventana, los vehículos solo analizarán su historial de CPMs con objetos que sean detectados dentro de ésta, eliminando así objetos muy antiguos y haciendo que el programa funcione de forma más fluida. Cuando un CAV transmisor detecta un objeto analiza su historial de CPMs recibidos mediante un condicional *if* para ver cuántas veces había recibido un CPM de este mismo objeto cuanto actuaba como un CAV transmisor. Si había recibido algún CPM de este CAV, lo contará y almacenará ese valor en *Sender_Count* (número de veces que el CAV transmisor ha recibido un CPM del objeto que acaba de detectar) para finalmente comparar si dicho valor es mayor o igual que *N_Redundancy* para proceder o no a la mitigación del objeto. Si es mayor o igual, se eliminará el objeto del CPM.



5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objeto del presente apartado es el análisis, explicación y discusión de los resultados obtenidos en las simulaciones con las reglas de generación de mensajes dispuestas por ETSI y explicadas en el apartado 3 y, a su vez, las diferentes técnicas y combinaciones de éstas que se han llevado a cabo en este documento.

En el punto 5.1. analizaremos los resultados obtenidos con las reglas de generación de mensajes de ETSI, e intentaremos promover por qué sería interesante recurrir a las técnicas de mitigación de redundancia.

En el punto 5.2, analizaremos cada una de las cuatro técnicas de forma individual y discutiremos cuál de ellas obtiene mejores resultados con diferentes densidades de tráfico. Por otro lado, en el punto 5.3. y posteriores, analizaremos y discutiremos las simulaciones obtenidas en escenarios mixtos, en los que diferentes vehículos emplean diferentes técnicas de mitigación de redundancia.

5.1. PARÁMETROS DEL ESCENARIO

En este punto se pretende describir el escenario que se ha usado para efectuar las simulaciones de los siguientes puntos del presente documento. En él se han dispuesto 840 vehículos en una carretera de 5 kilómetros de distancia y se han hecho las simulaciones para dos densidades de tráfico, baja densidad y alta densidad. Los vehículos disponen de dos sensores, uno trasero y otro delantero, con un rango de detección de 180° y un alcance de 150 metros. Las simulaciones tendrán una duración de 20 segundos (inicio de la simulación en 300 y fin en 320 segundos). La potencia de transmisión será de 23 dBm y tendrá un datarate de 100 Mbps.

5.2. RENDIMIENTO SIN MITIGACIÓN DE REDUNDANCIA

En este punto se van a analizar las simulaciones obtenidas con las reglas de generación de mensajes propuestas por ETSI, sin mitigación de redundancia.

La Figura 14 presenta la PDF (*Probability Density Function*) del número de objetos que se incluyen en cada CPM para baja y alta densidad de tráfico. Los resultados muestran que la mayor parte de CPMs contienen entre 5 y 10 objetos aproximadamente para densidades bajas. Cuando la densidad aumenta, el número de objetos por CPMs

disminuye debido fundamentalmente a dos motivos. El primero es que los vehículos circulan a menor velocidad y deben ser incluidos en CPMs con menor frecuencia. El segundo es que, al haber mayor densidad, los propios vehículos obstruyen la visión de los sensores.

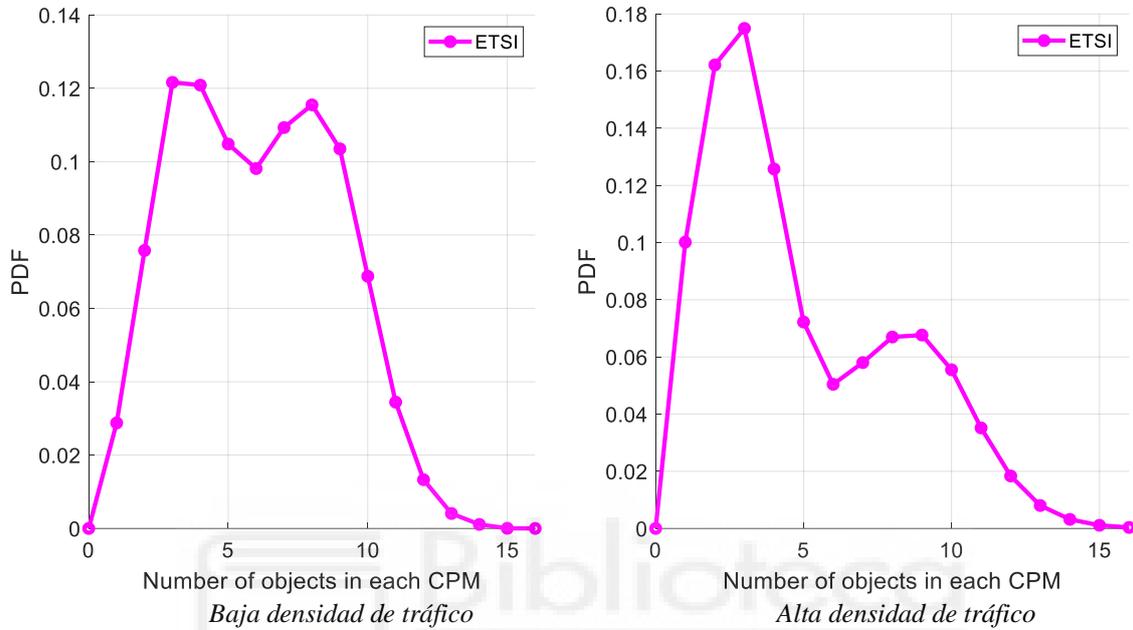


Figura 14. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM sin mitigación de redundancia

En la Figura 15 se presenta la PDF del número de CPMs que genera cada vehículo por segundo, de nuevo para densidad de tráfico baja y alta. Los resultados obtenidos muestran que los vehículos generan CPMs a 10Hz casi todo el tiempo, especialmente cuando la densidad de tráfico es baja puesto que los vehículos circulan a mayor velocidad.

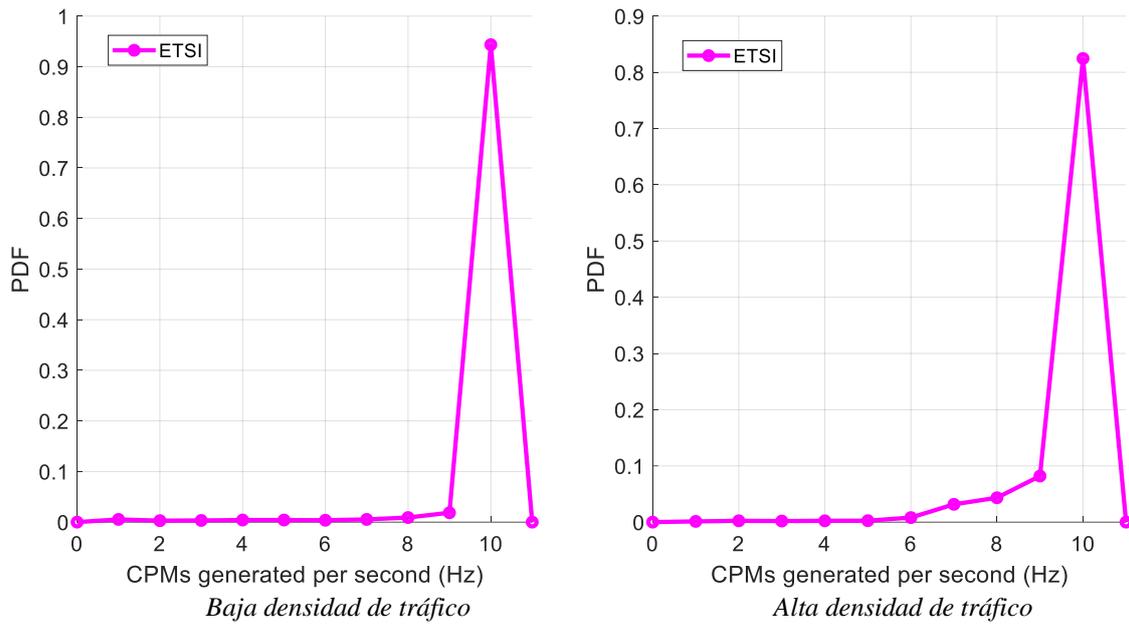


Figura 15. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo sin mitigación de redundancia

En la Tabla 5 se presenta el nivel de CBR (*Channel Busy Ratio*), que es una métrica utilizada para cuantificar la carga del canal. Representa el porcentaje de tiempo que un vehículo detecta el canal como ocupado. Los resultados obtenidos muestran que la CBR aumenta cuando se incrementa la densidad del tráfico, a pesar de que cada CPM contenga un menor número de objetos (Figura 14) y cada vehículo transmita menos CPMs por segundo (Figura 15). Eso es así porque el número de vehículos que transmiten es significativamente mayor cuando la densidad es alta.

<i>Densidad de Tráfico</i>	<i>CBR (%)</i>
Baja	27.48
Alta	45.16

Tabla 5. Ratio de ocupación del canal sin mitigación de redundancia (CBR)

La Figura 16 presenta la PDR o tasa de paquetes correctamente recibidos en función de la distancia entre transmisor y receptor, para las dos densidades de tráfico estudiadas. Se observa cómo al aumentar la densidad la PDR disminuye. Esto es debido a la mayor interferencia (mayor CBR) en el escenario de mayor densidad.

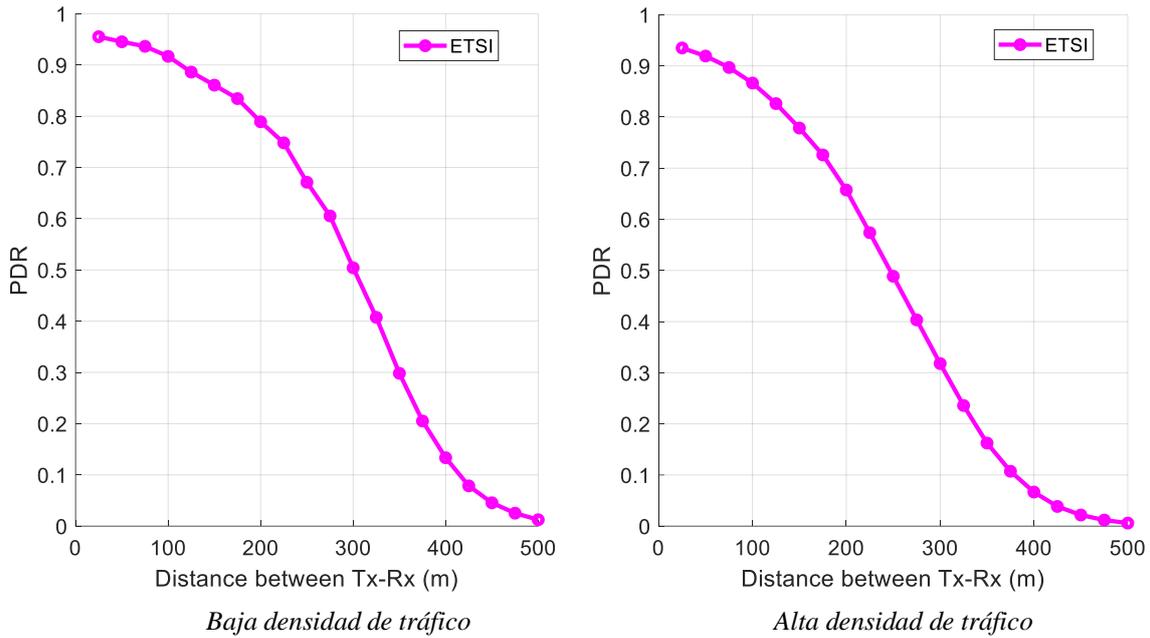


Figura 16. Ratio de entrega de paquetes sin mitigación de redundancia (PDR)

La Figura 17 presenta el ratio de percepción de objetos detectados con CPMs en función de la distancia entre el objeto y el vehículo que recibe los CPMs. Se considera un objeto como correctamente detectado si se recibe al menos un CPM con información sobre él en una ventana temporal. Dicha ventana temporal depende de la velocidad a la que se desplaza el objeto y es igual al tiempo necesario para que el objeto recorra 4m siguiendo las reglas de generación de CPMs. Los resultados muestran que los objetos se perciben con alta probabilidad hasta casi los 400m en densidades bajas. Cuando la densidad aumenta, la percepción disminuye debido fundamentalmente al aumento de la carga y la interferencia anteriormente mencionados.

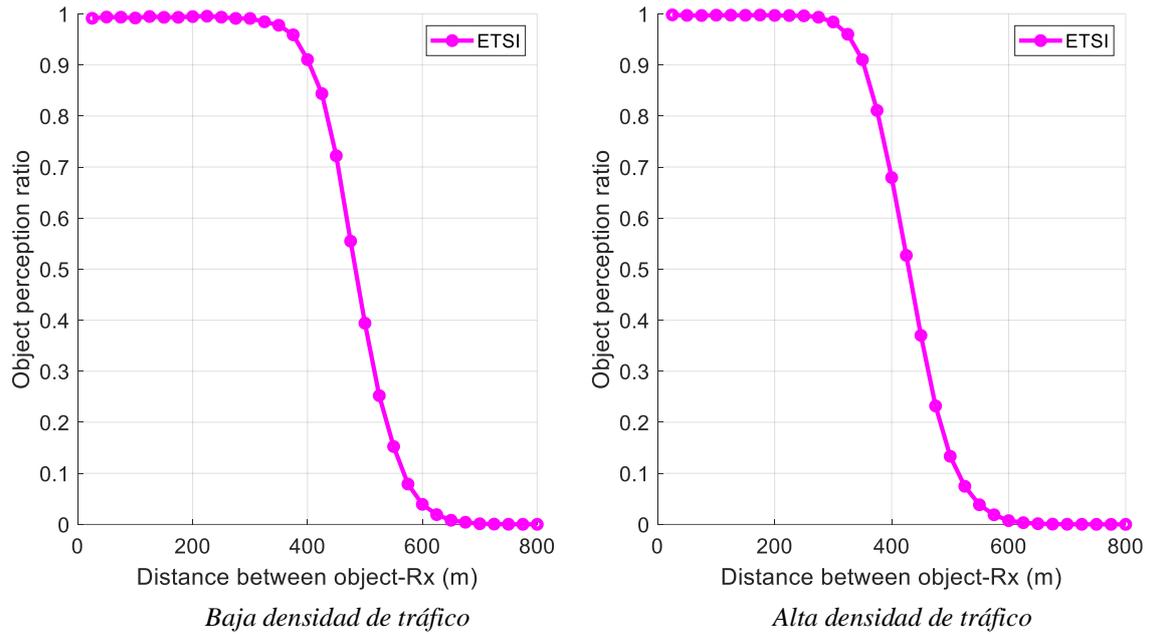


Figura 17. Ratio de percepción de objetos sin mitigación de redundancia

La Figura 18 presenta la redundancia experimentada en función de la distancia entre el receptor de los CPMs y el objeto. Esta métrica de redundancia se define como el número de veces que se recibe un CPM con información redundante sobre un objeto, enviada por cualquier vehículo cercano, en una ventana temporal igual a la ventana temporal empleada para calcular el ratio de percepción anteriormente explicado. Los resultados muestran que pueden recibirse hasta 10 veces información sobre un mismo objeto en baja densidad, o hasta 12 veces en alta densidad, cuando en teoría solo 1 recepción sería suficiente para detectarlo de forma satisfactoria. Estos resultados demuestran la necesidad de la mitigación de redundancia para reducir la carga en el canal.

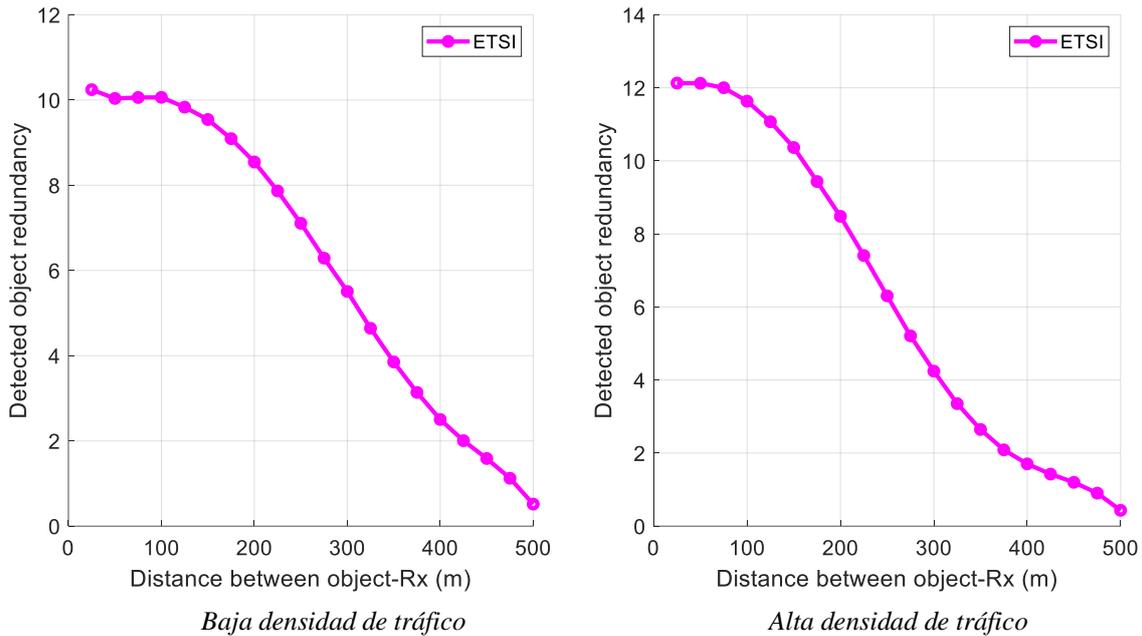


Figura 18. Redundancia del objeto detectado sin mitigación de redundancia

5.3. ESTUDIO DE TÉCNICAS INDIVIDUALES

En este apartado procederemos a analizar los resultados obtenidos para cada una de las cuatro técnicas implementadas de forma individual y discutiremos que técnica obtiene unos mejores resultados.

5.3.1. TÉCNICA BASADA EN LA DINÁMICA VEHICULAR

A continuación, vamos a analizar los resultados obtenidos para la técnica basada en la dinámica vehicular. En la Figura 19 se presenta la PDF del número de objetos que se insertan en cada CPM para las dos densidades de tráfico estudiadas y ETSI. En ella se presentan los resultados para dos valores de $P_Redundancy$ igual a 1m e igual a 4m y para un valor de $S_Redundancy$ de 0.5 m/s. Los resultados demuestran que al aumentar el umbral $P_Redundancy$ disminuye el número de objetos en un CPM. Esto se debe a que al aumentarlo se cumple la condición de mitigación de redundancia más frecuentemente, ya que la variable de la diferencia de la distancia entre la posición actual del objeto detectado y la posición que ocupaba la última vez que fue incluido en un CPM tendrá más complicado alcanzar dicho umbral, y por lo tanto, se omitirán más objetos del CPM. Podemos observar como para ambos valores de $P_Redundancy$ la técnica mejora considerablemente a ETSI, obteniendo unos porcentajes muy superiores para un bajo

número de objetos, sobretodo en la curva verde con $P_{Redundancy} = 4m$ donde a partir de 5 objetos el porcentaje es nulo para ambas densidades.

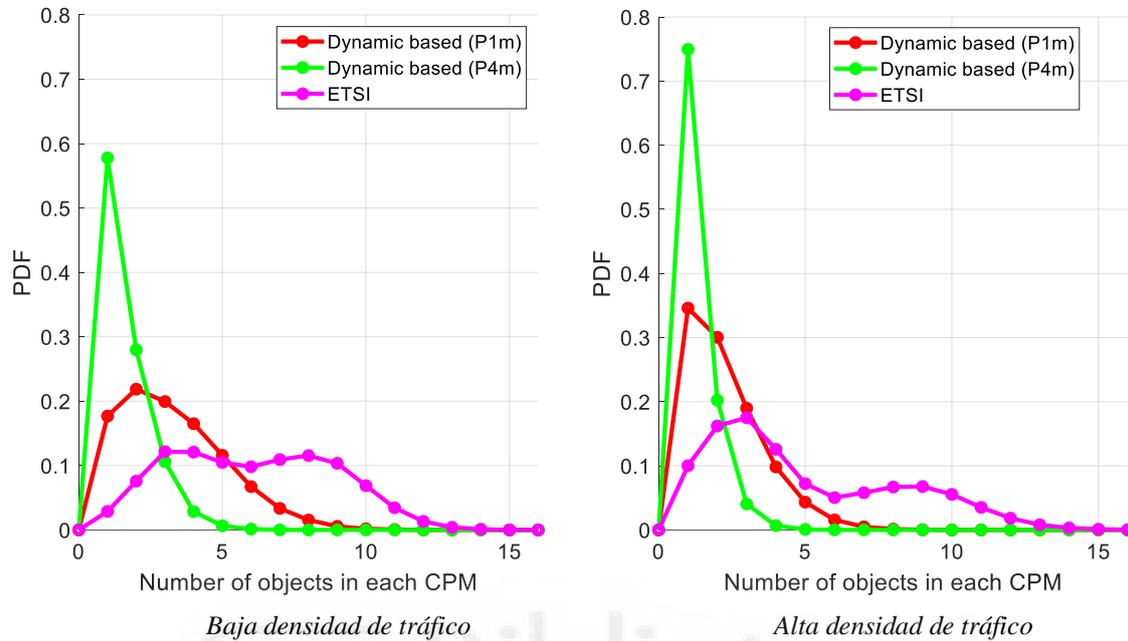


Figura 19. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM para la propuesta de 1m y de 4m

En la Figura 20 se presenta la PDF del número de CPMs que genera cada vehículo por segundo, de nuevo para densidad de tráfico baja y alta. Los resultados obtenidos muestran que los vehículos generan CPMs a 10 Hz casi todo el tiempo, especialmente cuando la densidad de tráfico es baja puesto que los vehículos circulan a mayor velocidad. Los resultados también demuestran que las dos curvas de $P_{Redundancy}$ reducen considerablemente la probabilidad de que los vehículos generen CPMs a 10 Hz respecto a ETSI.

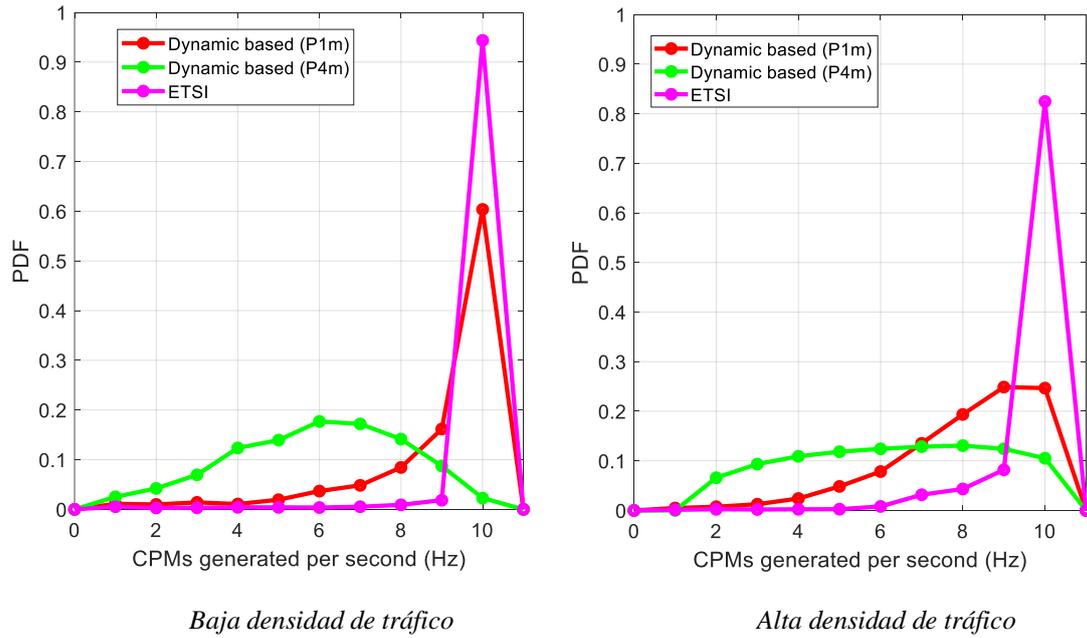


Figura 20. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo para la propuesta de 1m y de 4m

En la Tabla 6 se presenta el CBR para las dos densidades de tráfico estudiadas. Podemos destacar, como norma general, que cuando la variable $P_Redundancy$ alcanza el valor máximo se obtiene un menor porcentaje de CBR. Esto es así porque en ese caso la técnica de mitigación de redundancia omite un mayor número de objetos. También cabe destacar como al aumentar la densidad del tráfico aumenta el CBR del canal, esto se debe porque habrá un mayor número de vehículos.

<i>Densidad de Tráfico</i>	<i>P_Redundancy (m)</i>	<i>CBR (%)</i>
Baja	1	20.50
	4	11.78
Alta	1	31.71
	4	29.04

Tabla 6. Ratio de ocupación del canal para la técnica de la Dinámica vehicular (CBR)

En la Figura 21 se presenta la PDR o tasa de paquetes correctamente recibidos en función de la distancia entre transmisor y receptor, para las dos densidades de tráfico estudiadas. En ella se puede contemplar como al aumentar el umbral $P_Redundancy$ aumenta la PDR. Esto se debe a que cuando aumenta el umbral se descartan más objetos de los CPMs y se reduce la carga. Por lo tanto, habrá una menor probabilidad de que interfieran unos con otros entregando así más mensajes. Cuando aumenta la densidad de tráfico aumentará el número de vehículos y por lo tanto la interferencia, aunque en las curvas para ambos

valores de $P_Redundancy$ no parece que el PDR se vea afectado para esta técnica. Por otro lado, también cabe destacar como aumenta el PDR de forma considerable para la curva con $P_Redundancy = 4m$ en el escenario de baja densidad respecto a ETSI. En el escenario de alta densidad ambas curvas con la técnica aplicada son superiores a ETSI.

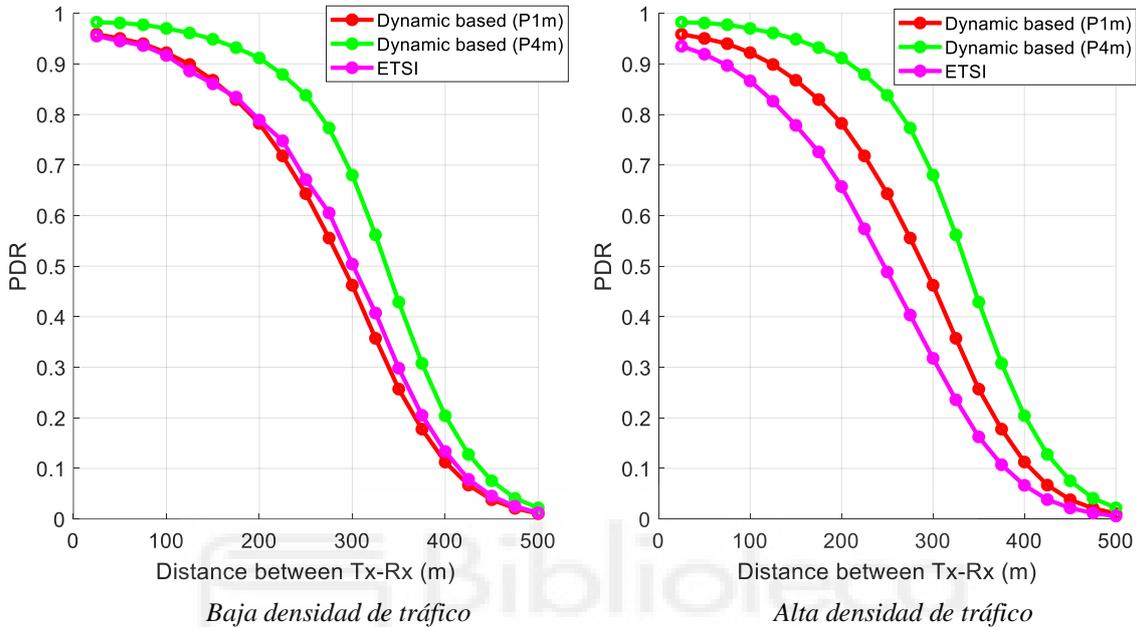


Figura 21. Ratio de entrega de paquetes para la propuesta de 1m y de 4m (PDR)

En la Figura 22 se presenta el ratio de percepción de objetos detectados con CPMs en función de la distancia entre el objeto y el vehículo que recibe los CPMs. En ella se puede contemplar como al aumentar el umbral $P_Redundancy$ la percepción del objeto disminuye. Esto es debido a que como se ha dicho anteriormente al aumentar dicho umbral la redundancia del objeto detectado decrece y, por lo tanto, al disminuir esto también se ve afectada la percepción. Por otro lado, podemos observar como la percepción disminuye cuando aumenta la densidad de tráfico. Esto es debido a que al haber un mayor número de vehículos los sensores tendrán más dificultades para detectar los diferentes objetos que haya en el escenario, ya que los vehículos que no se estén detectando en ese momento actuarán como obstáculos para los sensores. Ambas curvas obtienen una menor percepción respecto a ETSI, este es el coste de mejorar la redundancia del objeto detectado.

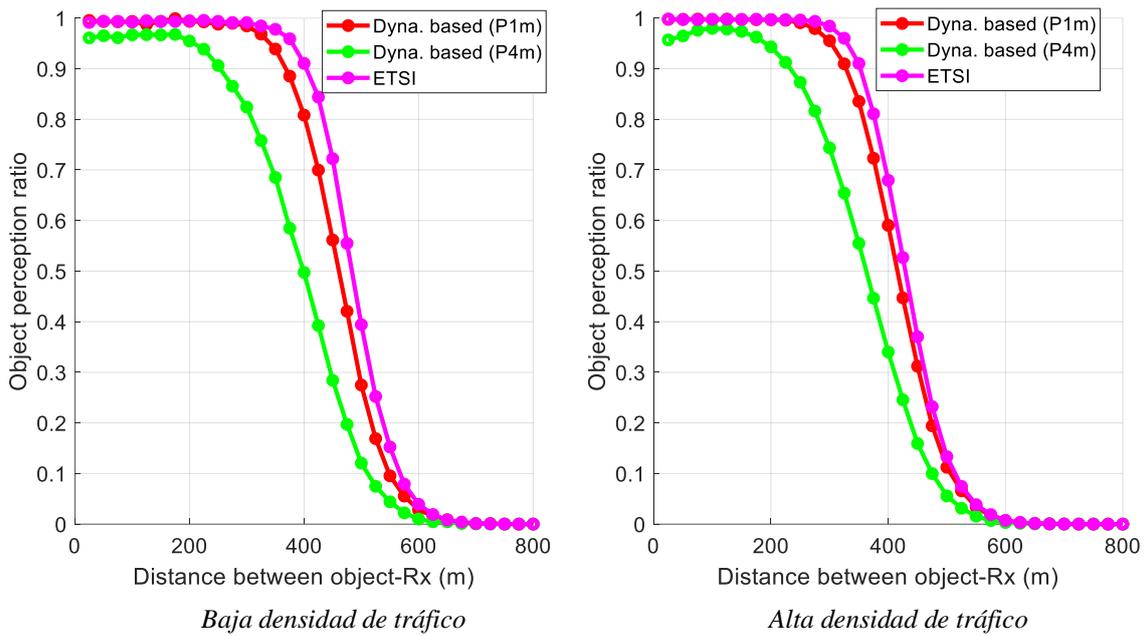


Figura 22. Ratio de percepción de objetos para la propuesta de 1m y de 4m

En la Figura 23 se presenta la redundancia experimentada en función de la distancia entre el receptor de los CPMs y el objeto. En ella se puede contemplar como al aumentar el umbral $P_{Redundancy}$ la redundancia disminuye. Esto es debido a que será más sencillo que la variable de la diferencia de la distancia entre la posición actual del objeto detectado y la posición que ocupaba la última vez que fue incluido en un CPM tendrá más complicado alcanzar dicho umbral, por lo tanto, se omitirán más objetos del CPM. Como norma general, podemos observar cómo esta redundancia aumenta al mismo tiempo que lo hace el CBR del canal. Ambas curvas obtienen una menor redundancia respecto a ETSI, con lo que se puede comprobar como la técnica afecta a la mitigación de los objetos.

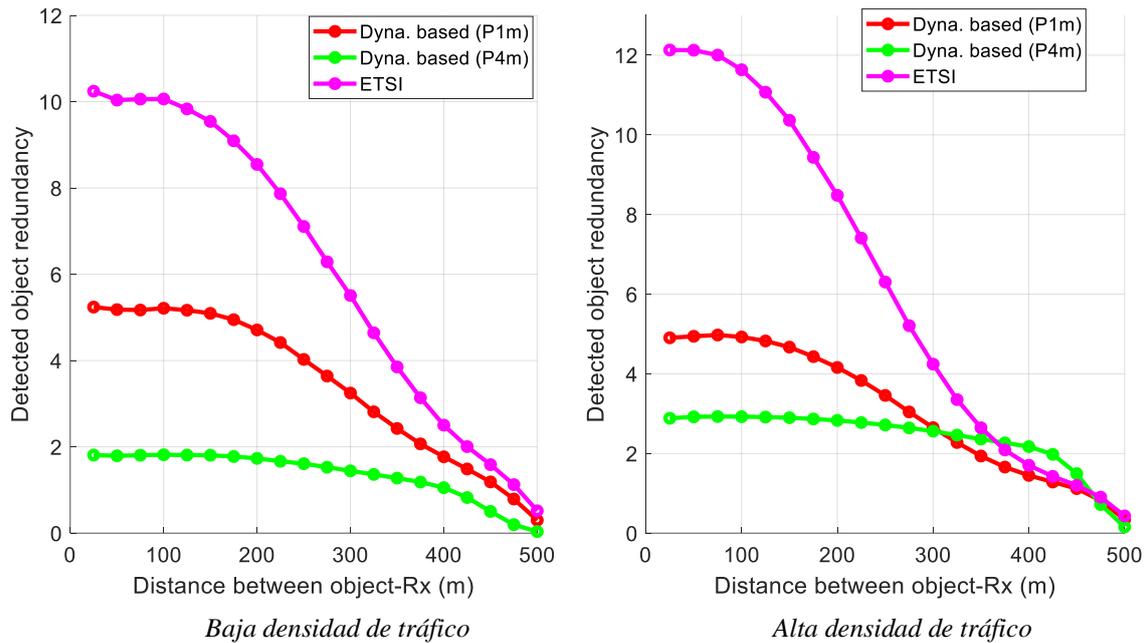


Figura 23. Redundancia del objeto detectado para la propuesta de 1m y de 4m

5.3.2. TÉCNICA BASADA EN DISTANCIA

A continuación, vamos a analizar los resultados obtenidos para la técnica basada en la distancia. En las Figura 24 se presenta la PDF del número de objetos que se insertan en cada CPM para las dos densidades de tráfico estudiadas. La técnica evaluará varios parámetros para llevar a cabo una menor o mayor inserción, nos referimos a que habrá que tener en cuenta $R_Redundancy$, $W_Redundancy$.

En ella podemos observar cómo al aumentar el umbral $R_Redundancy$ disminuye el número de objetos en un CPM, esto se debe a que al aumentarlo será más sencillo que se cumpla la condición de mitigación de redundancia, ya que la variable de la distancia euclídea entre el transmisor y remotos tendrá más complicado alcanzar dicho umbral, por lo tanto, se omitirán más objetos del CPM.

Los resultados demuestran como para los tres valores de $R_Redundancy$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI, dejando de obtener sobre todo para $R_Redundancy = 100$ m y $R_Redundancy = 150$ m porcentajes muy superiores para un alto número de objetos en un CPM y siendo prácticamente nulas a partir de 10 objetos.

Las Figuras 25 y 26 son análogas a la 24 pero variando $W_Redundancy$. Los resultados también demuestran como al aumentar la longitud de ventana $W_Redundancy$ disminuirá el número de objetos que alberga un CPM, ya que la variable de la diferencia de tiempo

entre la última vez que fue añadido un objeto y la detección actual tendrá más dificultad en alcanzar este tamaño de ventana.

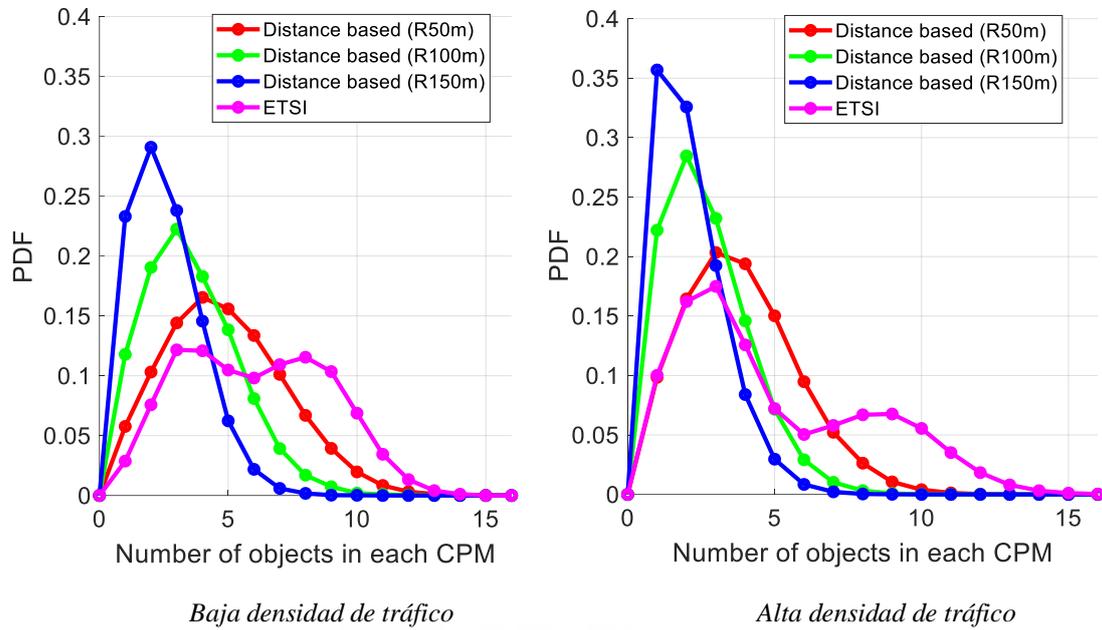


Figura 24. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con $W_{Redundancy} 0.1 s$

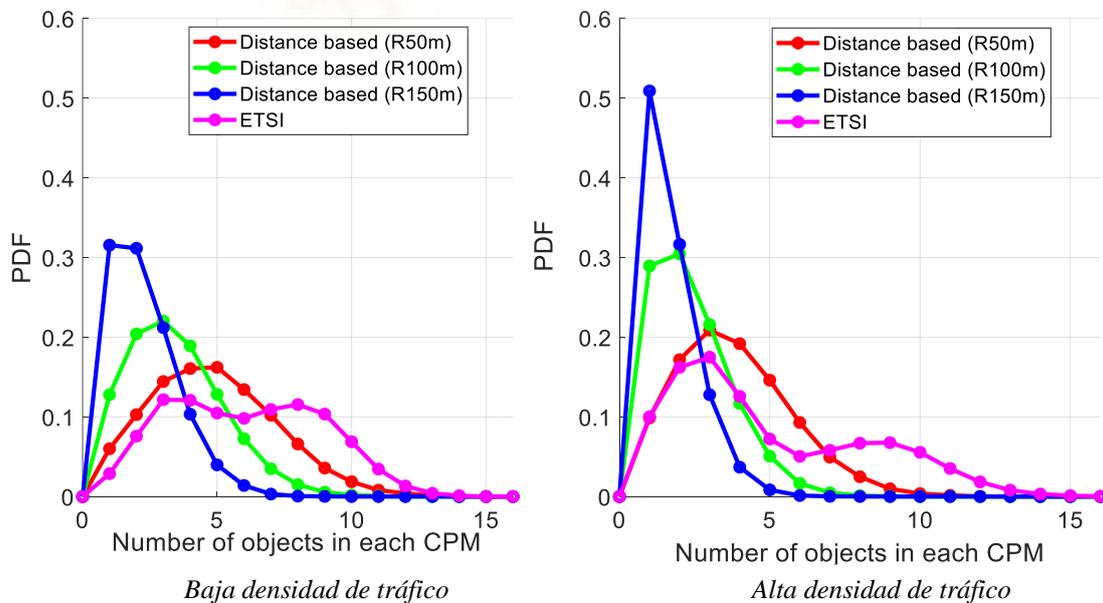


Figura 25. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con $W_{Redundancy} 0.2 s$

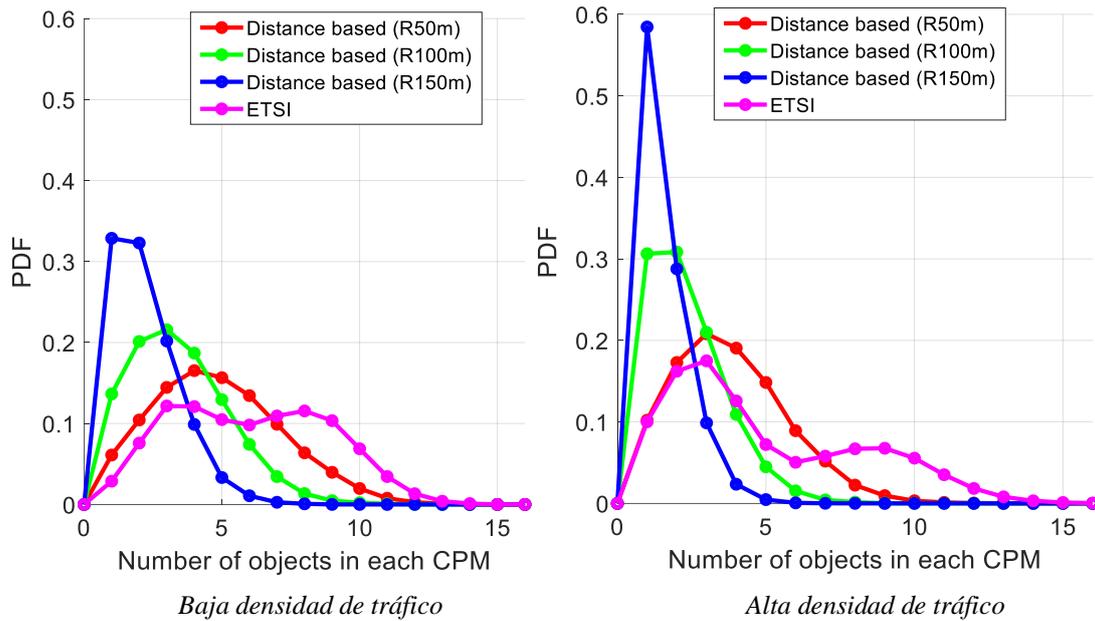


Figura 26. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con $W_Redundancy$ 0.3 s

En la Figura 27 se presenta la PDF del número de CPMs que genera cada vehículo por segundo para las dos densidades de tráfico estudiadas. Se puede contemplar como al aumentar el umbral $R_Redundancy$ disminuye la probabilidad de que los vehículos generen CPMs a 10 Hz casi todo el tiempo sobre todo a baja densidad de tráfico, ya que los vehículos circulan a mayor velocidad. Por lo tanto, al aumentar dicho umbral será más sencillo que se cumpla la condición de mitigación de redundancia, ya que la variable de la distancia euclídea entre CAVs remotos tendrá más complicado alcanzarlo.

Los resultados demuestran como para los tres valores de $R_Redundancy$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI, disminuyendo los altos porcentajes de que los vehículos generen CPMs a 10 Hz.

Las Figuras 28 y 29 son análogas a la 27 pero variando $W_Redundancy$. Los resultados también demuestran como al aumentar la longitud de ventana $W_Redundancy$ disminuirá tanto la probabilidad del número de CPMs que se generan por segundo como la generación de éstos, ya que la variable de la diferencia de tiempo entre la última vez que fue añadido un objeto y la detección actual tendrá más dificultad en alcanzar este tamaño de ventana.

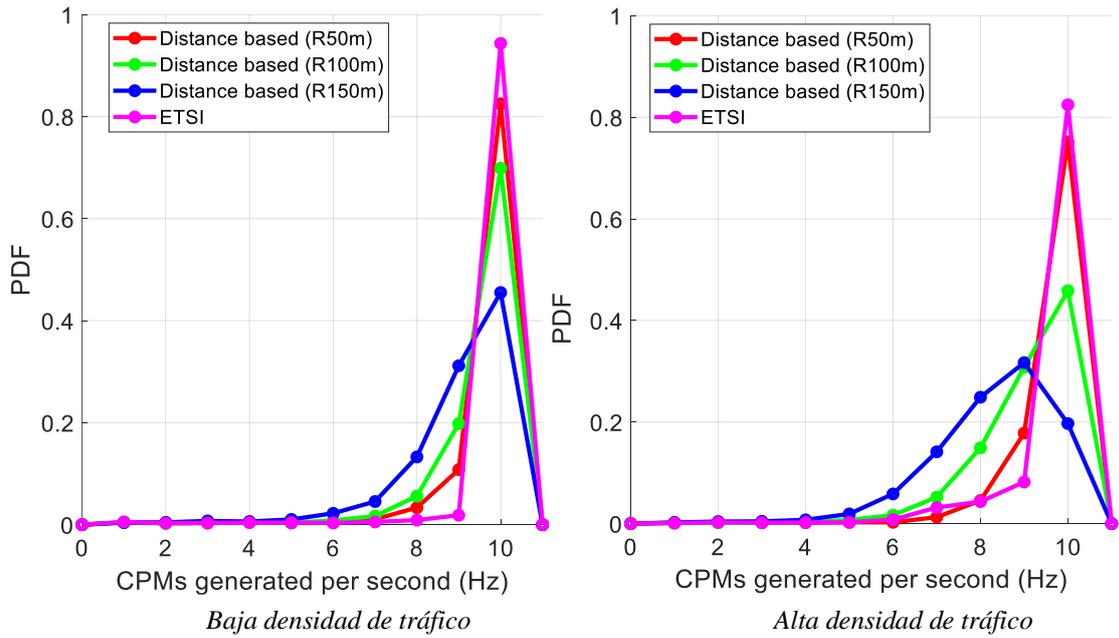


Figura 27. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con $W_Redundancy$ 0.1 s

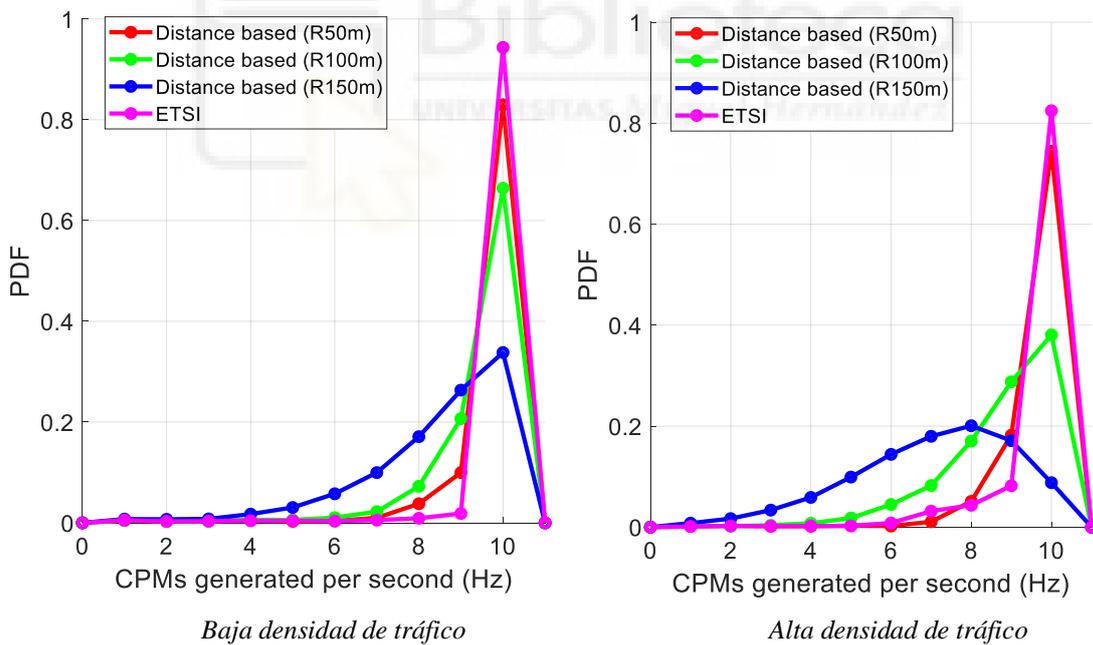


Figura 28. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con $W_Redundancy$ 0.2 s

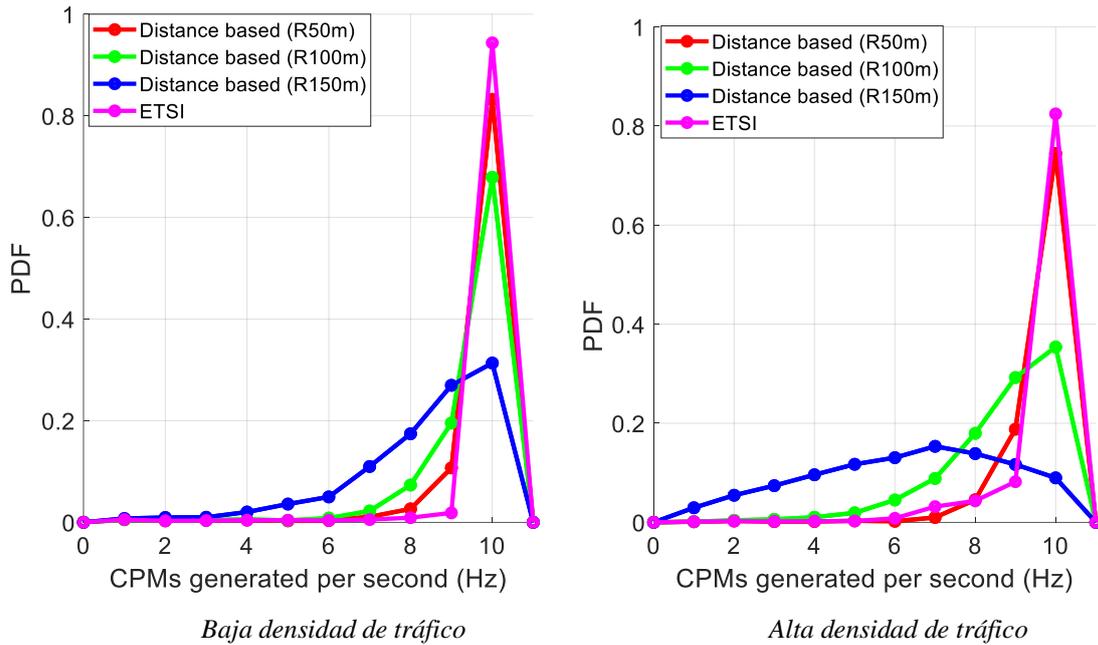


Figura 29. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con $W_Redundancy$ 0.3 s

En la Tabla 7 se presenta el nivel de CBR que representa el porcentaje de tiempo que un vehículo detecta el canal como ocupado. Los resultados obtenidos muestran que la CBR aumenta cuando se incrementa la densidad del tráfico, a pesar de que cada CPM contenga un menor número de objetos (Figura 24) y cada vehículo transmita menos CPMs por segundo (Figura 27). Eso es así porque el número de vehículos que transmiten es significativamente mayor cuando la densidad es alta. Podemos destacar como norma general, que cuando $R_Redundancy$ y $W_Redundancy$ alcanzan el valor máximo se obtiene un menor porcentaje de CBR como se esperaba. Esto se debe a que hay un mayor número de objetos que cumplen las condiciones para ser considerados como redundantes, y por tanto no se transmiten. Los resultados de esta tabla demuestran como para los tres valores de $R_Redundancy$ y para ambas densidades de tráfico se reduce el CBR respecto a ETSI, el cual era de 27.48% para baja densidad y de 45.16% para alta densidad.

Densidad de Tráfico	$R_Redundancy$ (m)	CBR (%)		
		$W_Redundancy$ 0.1 (s)	$W_Redundancy$ 0.2 (s)	$W_Redundancy$ 0.3 (s)
Baja	50	25.26	25.23	25.23
	100	22.77	22.41	22.41
	150	20.32	18.80	18.48
Alta	50	42.33	42.24	42.10
	100	37.40	35.56	35.09
	150	33.58	28.75	25.94

Tabla 7. Ratio de ocupación del canal para la técnica de la Distancia (CBR)

En las Figura 30 se presenta la PDR o tasa de paquetes recibidos en función de la distancia entre transmisor y receptor para las dos densidades de tráfico estudiadas. Se puede contemplar como al aumentar la densidad la PDR disminuye y como al aumentar el umbral $R_Redundancy$ aumenta la PDR, esto se debe a que al aumentar el umbral se descartan más objetos de los CPMs y se envían menos de estos, por lo tanto, habrá una menor probabilidad de que interfieran unos con otros entregando así más mensajes.

Los resultados demuestran como para los tres valores de $R_Redundancy$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI, disminuyendo la redundancia en el canal al aplicar la técnica, y, mejorando así el ratio de paquetes entregados.

Las figuras 31 y 32 son análogas a la 30 pero variando $W_Redundancy$. Los resultados también demuestran como al aumentar la longitud de ventana $W_Redundancy$ aumentará el PDR, ya que al aumentar dicha longitud se enviarán menos CPMs al omitirse un número mayor de éstos y habrá una menor probabilidad de interferencia entre mensajes enviados por los vehículos.

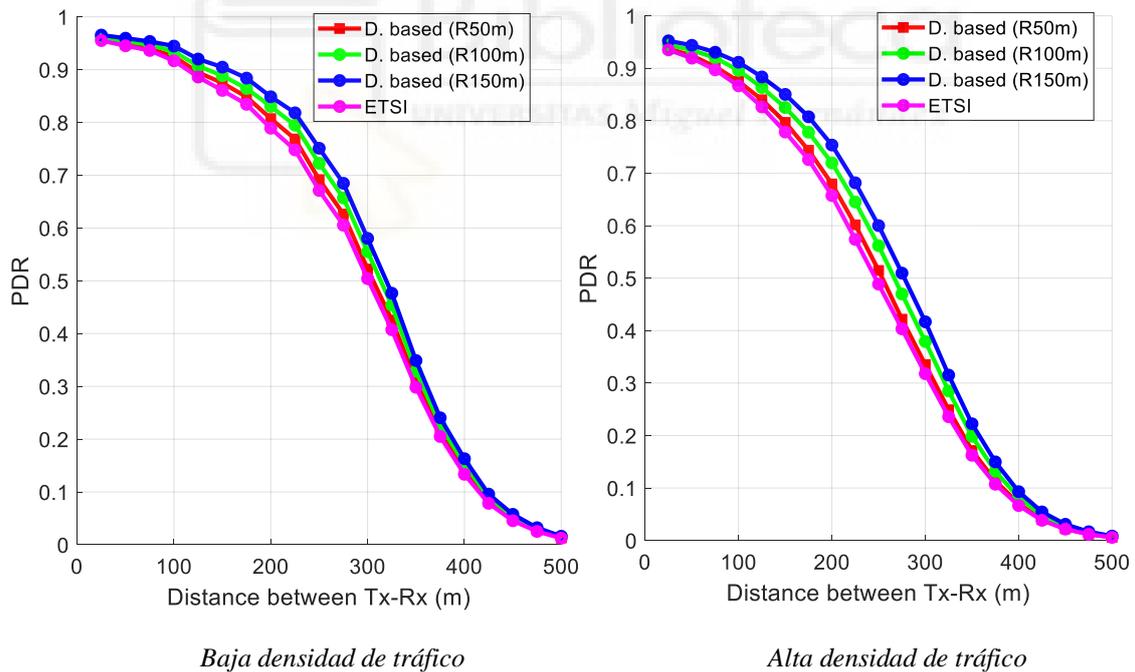


Figura 30. Ratio de entrega de paquetes con $W_Redundancy$ 0.1 s (PDR)

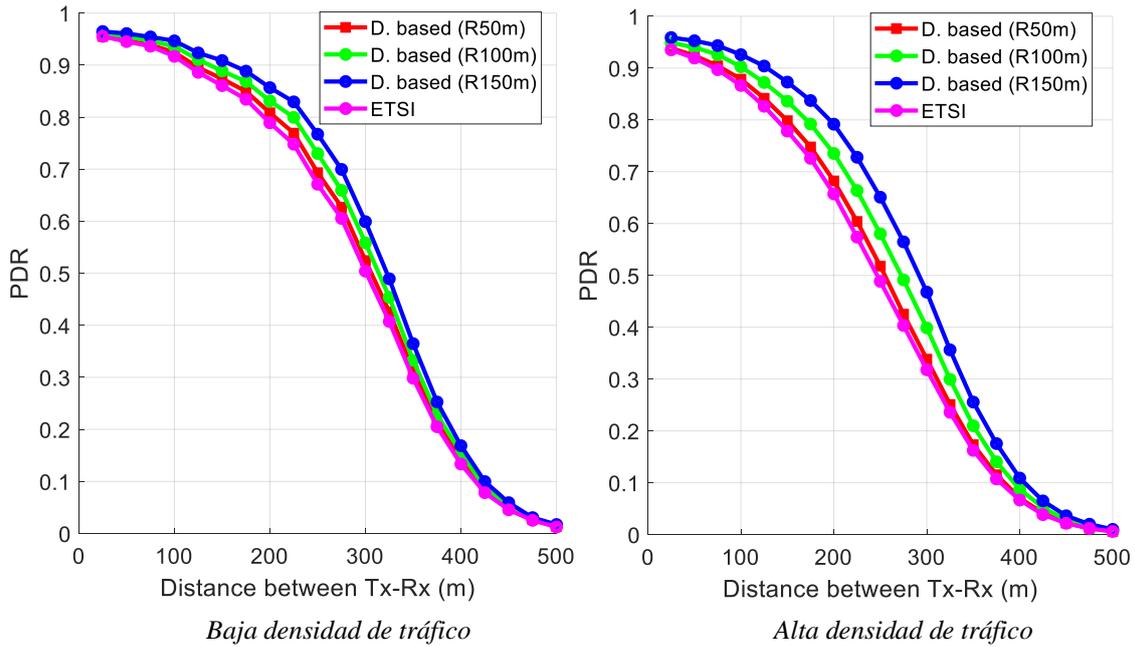


Figura 31. Ratio de entrega de paquetes con $W_Redundancy$ 0.2 s (PDR)

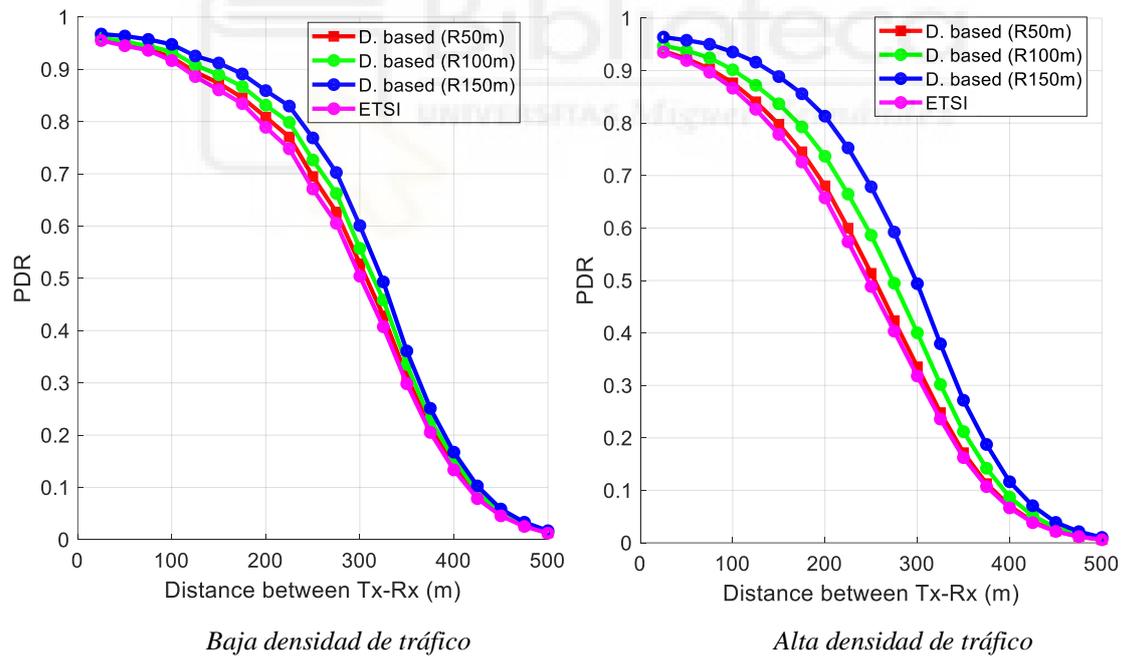


Figura 32. Ratio de entrega de paquetes con $W_Redundancy$ 0.3 s (PDR)

En la Figura 33 se presenta el ratio de percepción de objetos detectados con CPMs en función de la distancia entre el objeto y el vehículo que recibe los CPMs. Los resultados muestran que los objetos se perciben con alta probabilidad hasta los 350 m para $R_Redundancy = 50$ y $R_Redundancy = 100$ en densidades bajas, y, hasta los 320 m

aproximadamente para $R_Redundancy = 150m$. Cuando la densidad aumenta, la observamos como la percepción disminuye debido fundamentalmente al aumento de la carga y la interferencia en el canal. Los resultados también demuestran como al aumentar el umbral $R_Redundancy$ la percepción del objeto disminuye siendo las tres curvas inferiores a ETSI, esto se debe a que al aumentar dicho umbral la redundancia del objeto detectado decrece respecto a ETSI, por lo tanto, al disminuir esto también se verá afectada la percepción en esta técnica.

Las Figuras 34 y 35 son análogas a la 33 pero variando $W_Redundancy$. En este caso los resultados demuestran como al aumentar la longitud de ventana $W_Redundancy$ disminuye la redundancia y, por lo tanto, se verá afectada la percepción.

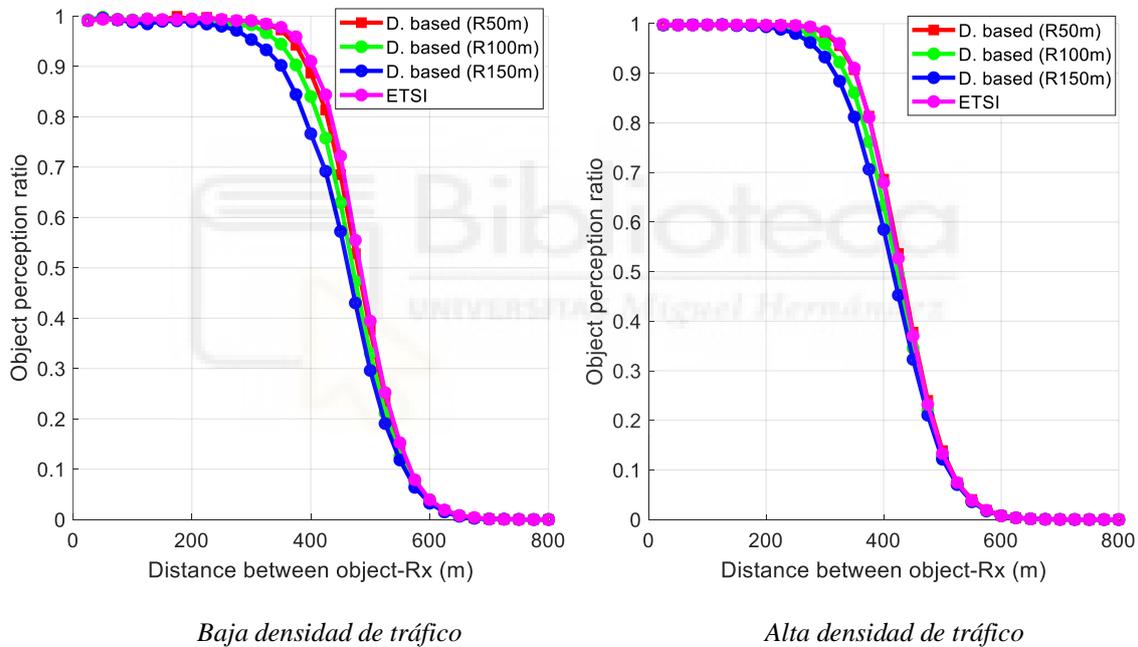


Figura 33. Ratio de percepción de objetos con $W_Redundancy 0.1 s$

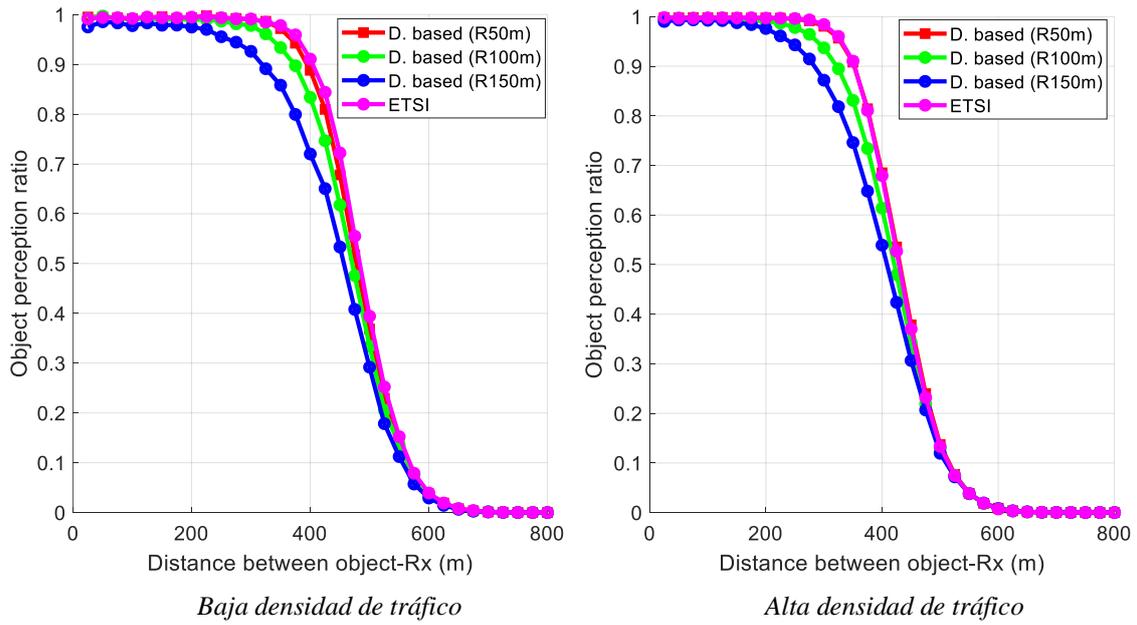


Figura 34. Ratio de percepción de objetos con $W_Redundancy$ 0.2 s

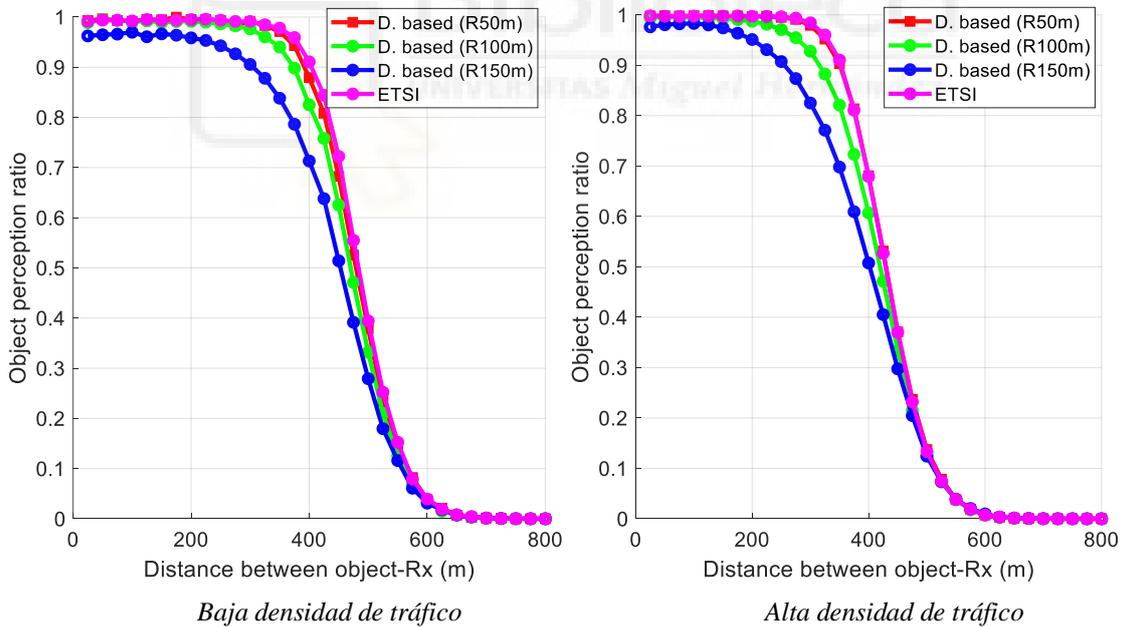


Figura 35. Ratio de percepción de objetos con $W_Redundancy$ 0.3 s

En la Figura 36 se presenta la redundancia experimentada en función de la distancia entre el receptor de los CPMs y el objeto. En ella se puede observar como al aumentar el umbral $R_Redundancy$ la redundancia del objeto detectado disminuye en ambos escenarios, esto es debido a que será más sencillo que se cumpla la condición de mitigación de redundancia, ya que la variable de la distancia euclídea entre CAVs remotos tendrá más complicado alcanzar dicho umbral. En el escenario de baja densidad se detecta una menor redundancia del objeto al haber menos vehículos transmitiendo CPMs. Los resultados demuestran como para los tres valores de $R_Redundancy$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI, disminuyendo la redundancia del objeto respecto a ésta.

Las Figuras 37 y 38 son análogas a la 36 pero variando $W_Redundancy$. En este caso los resultados demuestran como al aumentar la longitud de ventana $W_Redundancy$ disminuye la redundancia del objeto debido a que al analizar un tamaño de ventana superior habrá mayor probabilidad de que se cumplan las condiciones de mitigación.

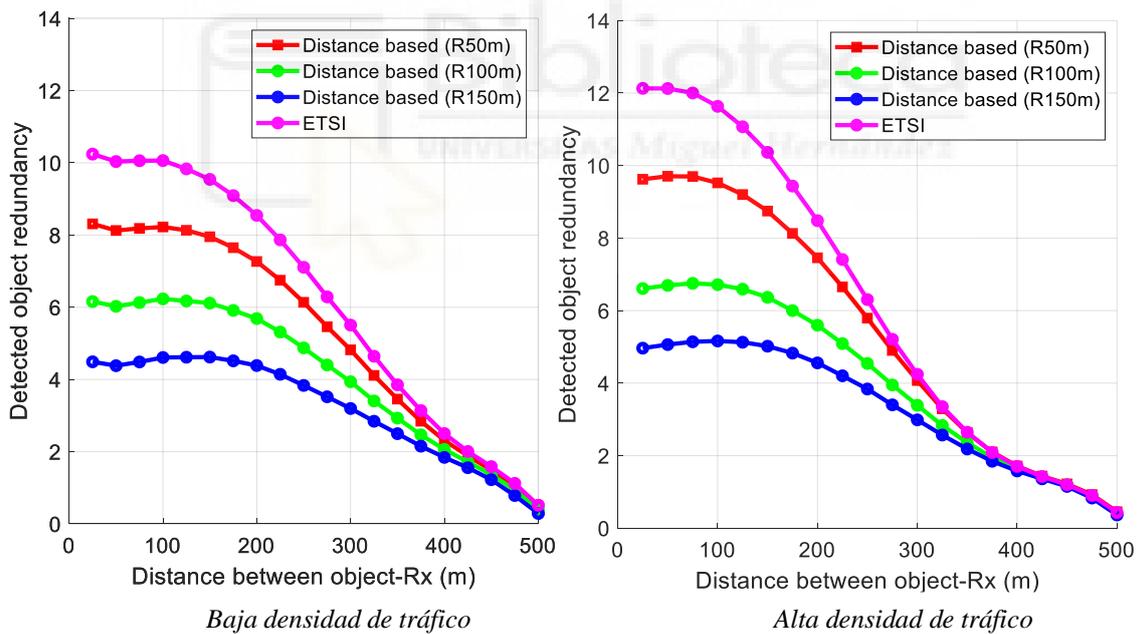


Figura 36. Redundancia del objeto detectado con $W_Redundancy$ 0.1 s

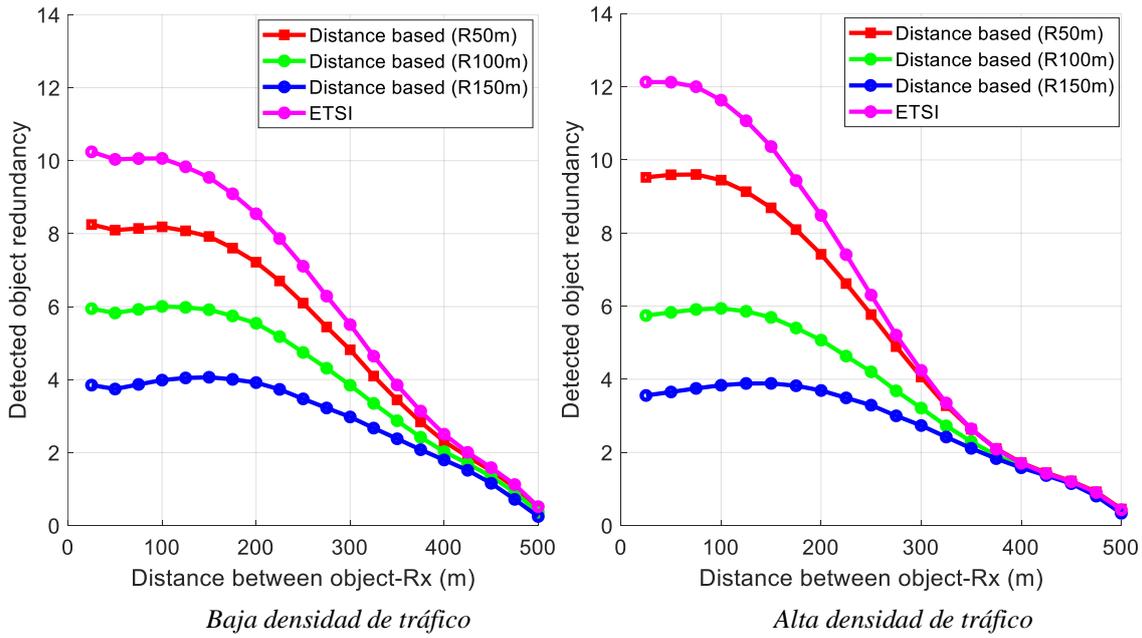


Figura 37. Redundancia del objeto detectado con $W_Redundancy$ 0.2 s

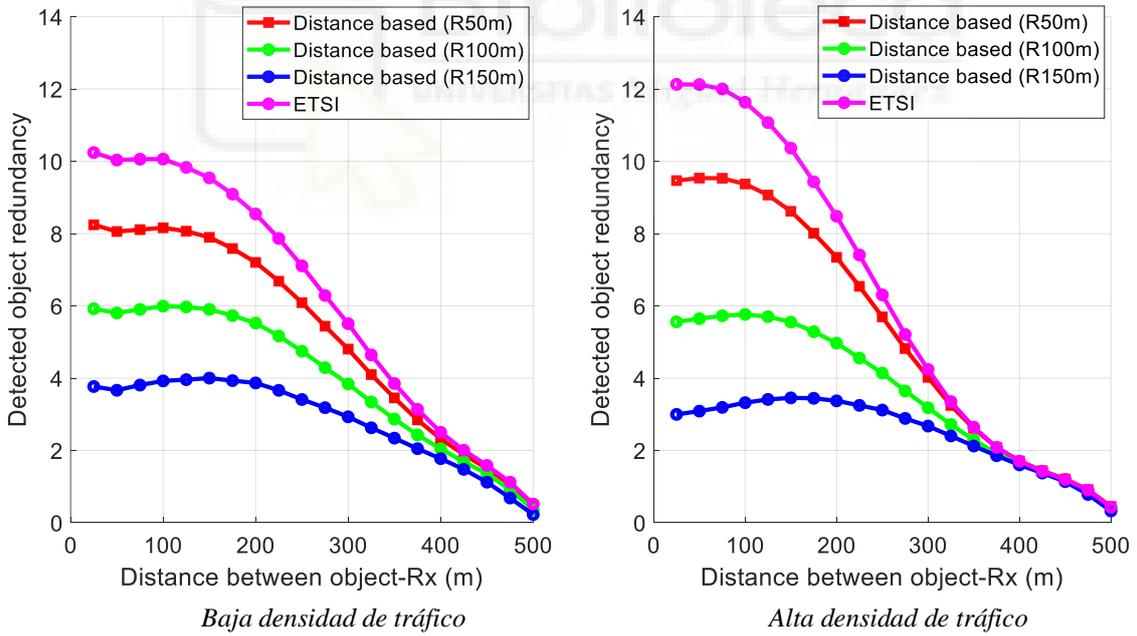


Figura 38. Redundancia del objeto detectado con $W_Redundancy$ 0.3 s

5.3.3. TÉCNICA BASADA EN FRECUENCIA

A continuación, vamos a analizar los resultados obtenidos para la técnica basada en la frecuencia. En la Figura 39 se presenta la PDF del número de objetos que se insertan en cada CPM para las dos densidades de tráfico estudiadas. La técnica evaluará varios parámetros para llevar a cabo una menor o mayor inserción, nos referimos a que habrá que tener en cuenta $N_Redundancy$, $W_Redundancy$.

En ella podemos observar como al aumentar el umbral $N_Redundancy$ aumenta el número de objetos en un CPM, esto es debido a que al aumentarlo será más complicado que se cumpla la condición de mitigación de redundancia, ya que la variable de la cuenta del objeto tendrá más complicado ser mayor o igual que dicho umbral, por lo tanto, se omitirán menos objetos del CPM.

Los resultados demuestran como para los tres valores de $N_Redundancy$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI, dejando de obtener sobre todo para $N_Redundancy = 2$ y $N_Redundancy = 4$ porcentajes muy superiores para un alto número de objetos en un CPM y siendo prácticamente nulas a partir de 10 objetos en el escenario de baja densidad. Para el escenario de alta densidad observamos como para $N_Redundancy = 6$ no es nulo el porcentaje de 10 objetos en un CPM, esto es debido a que al haber mayor tráfico habrá más vehículos transmitiendo CPMs.

Las Figuras 40 y 41 son análogas a la 39 pero variando $W_Redundancy$. Los resultados también demuestran como al aumentar la longitud de ventana $W_Redundancy$ disminuirá el número de objetos que alberga un CPM. Esto es debido a que la variable de la diferencia de tiempo entre la última vez que fue añadido un objeto y la detección actual tendrá más dificultad en alcanzar este tamaño de ventana.

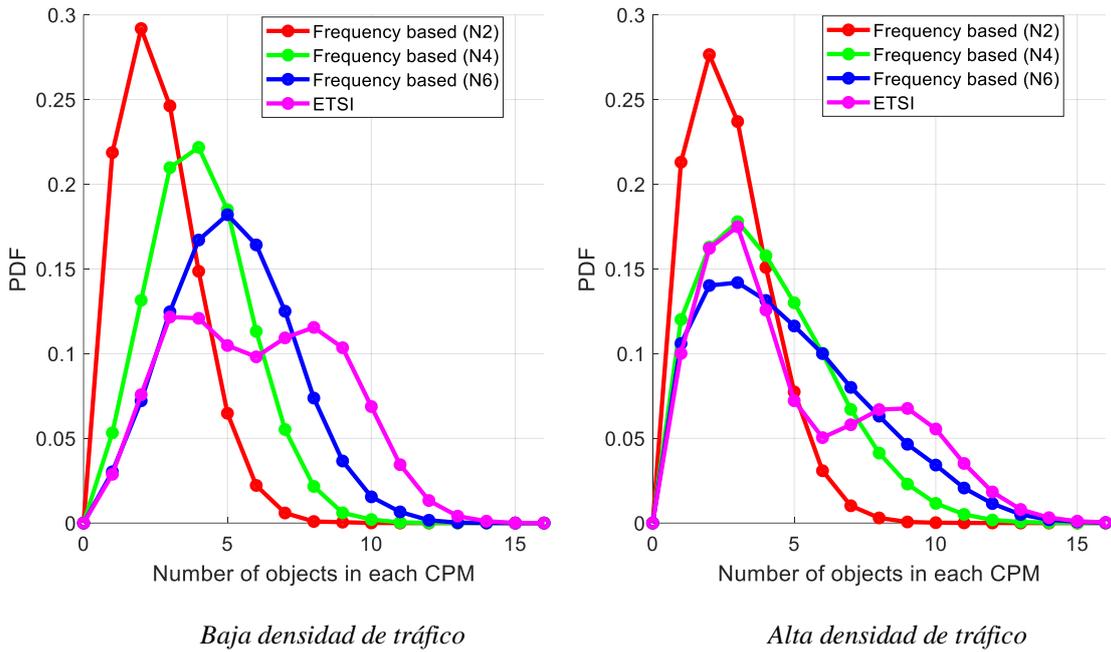


Figura 39. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con $W_Redundancy$ 0.1 s

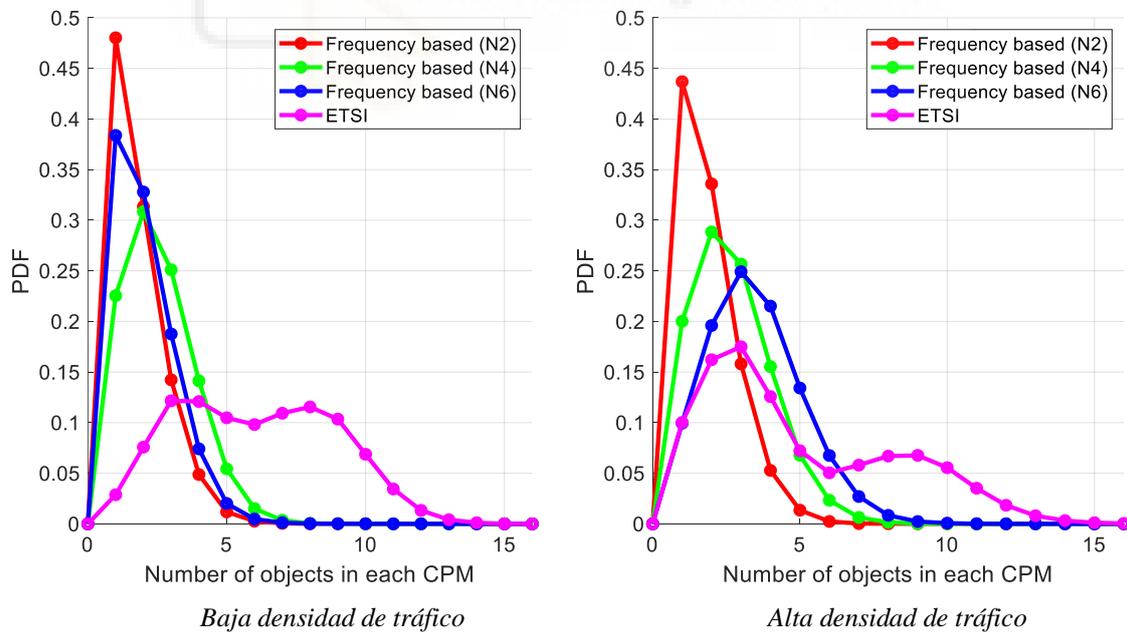


Figura 40. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con $W_Redundancy$ 0.2 s

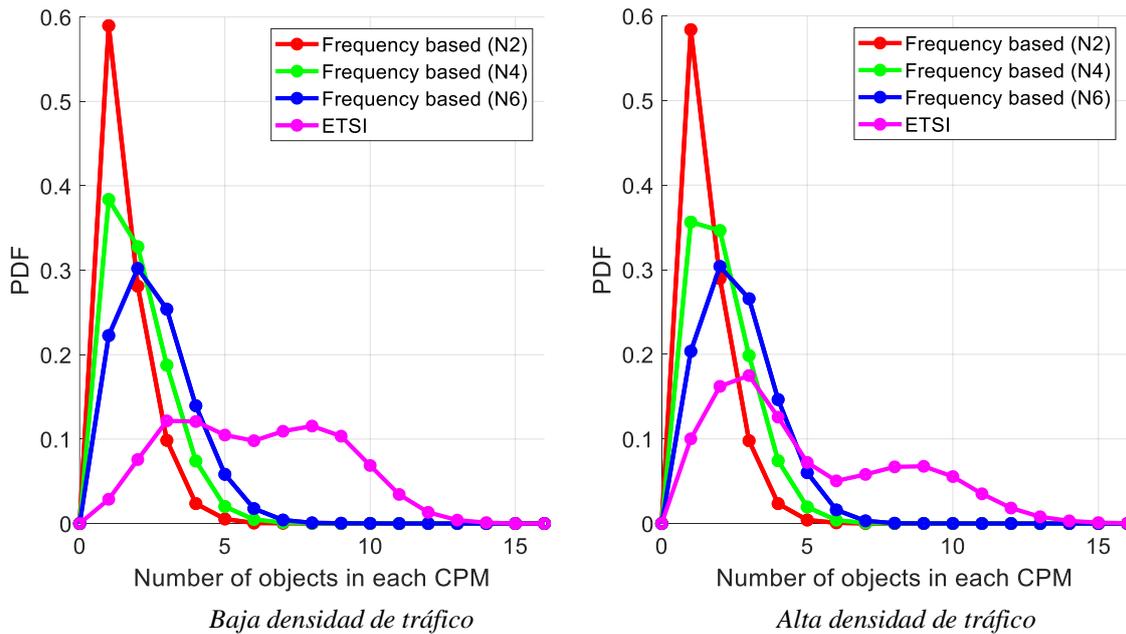


Figura 41. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con $W_Redundancy$ 0.3

En la Figura 42 se presenta la PDF del número de CPMs que genera cada vehículo por segundo para las dos densidades de tráfico estudiadas. Se puede contemplar como al aumentar el umbral $N_Redundancy$ aumenta la probabilidad de que los vehículos generen CPMs a 10 Hz casi todo el tiempo sobre todo a baja densidad de tráfico, ya que los vehículos circulan a mayor velocidad. Por lo tanto, este aumento, hará que la variable de la cuenta del objeto tenga más complicado ser mayor o igual que dicho umbral y se omitirán menos objetos del CPM.

Los resultados demuestran como para los tres valores de $N_Redundancy$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI, disminuyendo los altos porcentajes de que los vehículos generen CPMs a 10 Hz.

Las Figuras 43 y 44 son análogas a la 42 pero variando $W_Redundancy$. Los resultados también demuestran como al aumentar la longitud de ventana $W_Redundancy$ el CAV transmisor analizará un segmento mayor del historial de CPMs recibidos, por lo que podrá cumplir de manera más sencilla la condición de mitigación del objeto y disminuirá el porcentaje del número de CPMs que se generan por segundo.

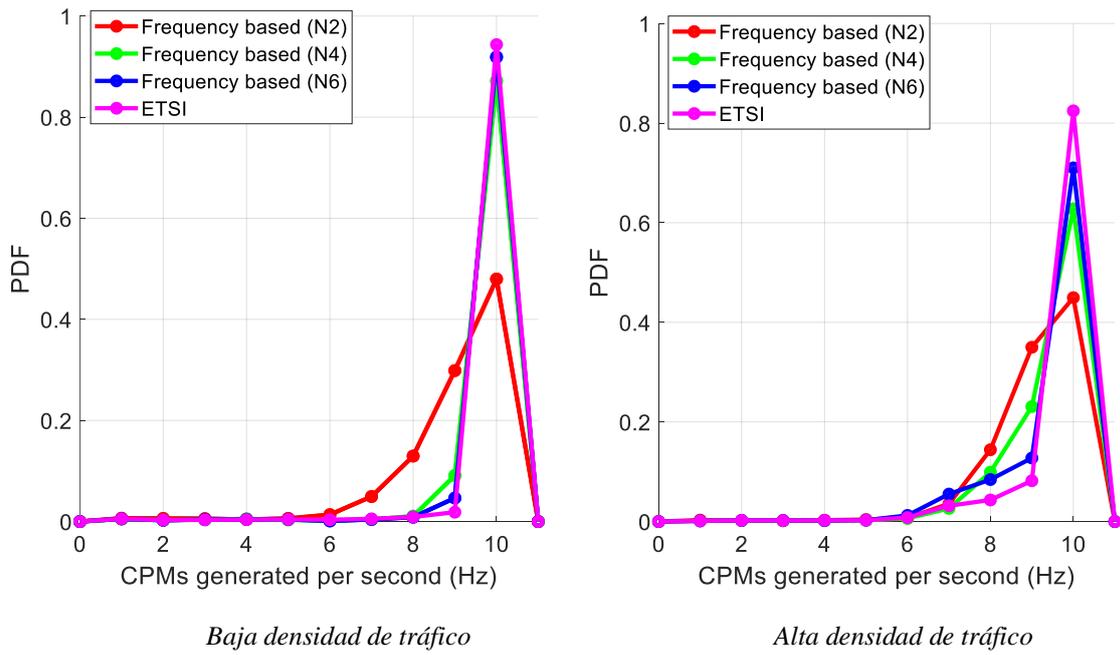


Figura 42. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con $W_Redundancy$ 0.1 s

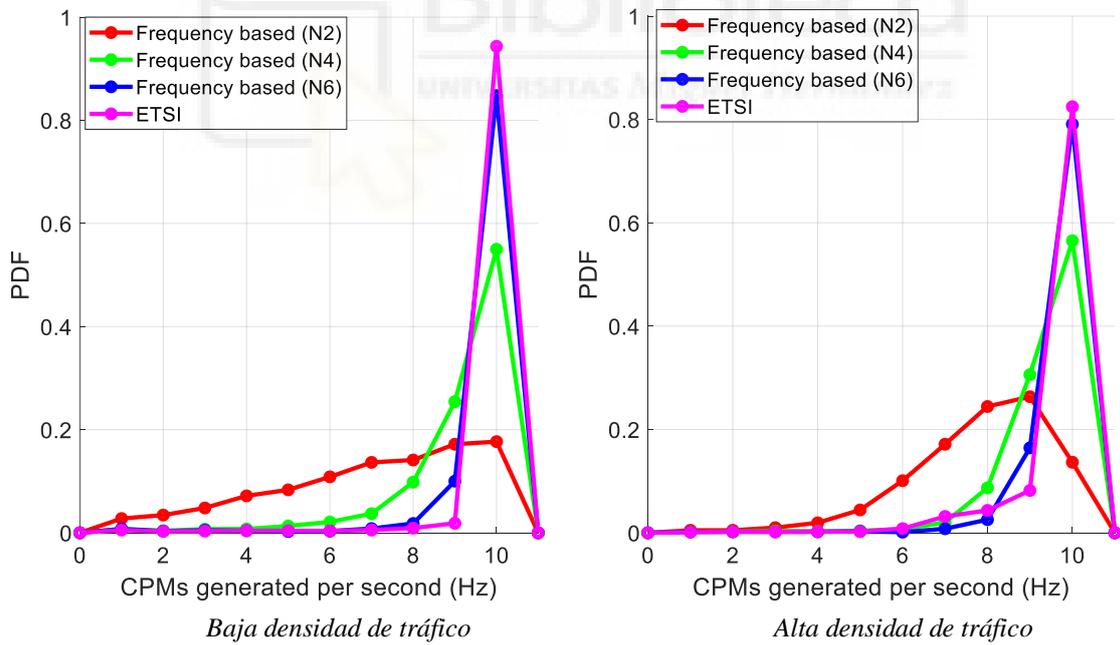


Figura 43. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con $W_Redundancy$ 0.1 s

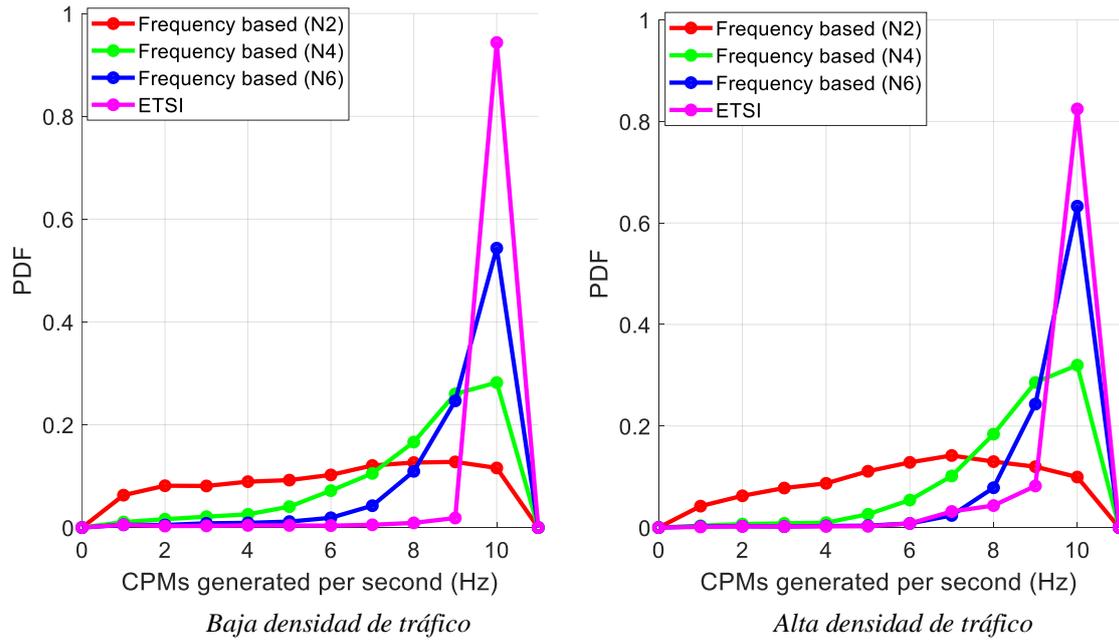


Figura 44. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con $W_{Redundancy}$ 0.3 s

En la Tabla 8 se presenta el nivel de CBR que representa el porcentaje de tiempo que un vehículo detecta el canal como ocupado. Los resultados obtenidos muestran que la CBR aumenta cuando se incrementa la densidad del tráfico, esto se debe a que hay un mayor número de vehículos transmitiendo cuando la densidad es alta. Podemos destacar como norma general, que cuando $N_{Redundancy}$ alcanza el valor mínimo y $W_{Redundancy}$ el valor máximo se obtiene un menor porcentaje de CBR como se esperaba. Los resultados de esta tabla demuestran como para los tres valores de $N_{Redundancy}$ y $W_{Redundancy}$ y para ambas densidades de tráfico se reduce el CBR respecto a ETSI, el cual era de 27.48% para baja densidad y de 45.16% para alta densidad.

Densidad de Tráfico	$N_{Redundancy}$	CBR (%)		
		$W_{Redundancy}$ 0.1 (s)	$W_{Redundancy}$ 0.2 (s)	$W_{Redundancy}$ 0.3 (s)
Baja	2	20.58	15.84	13.63
	4	24.19	20.58	17.97
	6	26.09	23.00	20.58
Alta	2	37.83	31.69	25.90
	4	42.27	38.31	34.15
	6	44.26	41.54	38.29

Tabla 8. Ratio de ocupación del canal para la técnica de la Frecuencia (CBR)

En la Figura 45 se presenta la PDR o tasa de paquetes recibidos en función de la distancia entre transmisor y receptor para las dos densidades de tráfico estudiadas. Se puede contemplar como al tener un umbral $N_Redundancy$ inferior aumenta la probabilidad de paquetes entregados, esto se debe a que se alcanzará antes este umbral y se descartarán más objetos de los CPMs haciendo que haya menor interferencia en el canal y entregándose más mensajes entre CAVs.

Los resultados demuestran como para los tres valores de $N_Redundancy$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI, disminuyendo la redundancia en el canal al aplicar la técnica, y, mejorando así el ratio de paquetes entregados.

Las Figuras 46 y 47 son análogas a la 45 pero variando $W_Redundancy$. Los resultados también demuestran como al aumentar la longitud de ventana $W_Redundancy$ aumentará el PDR, ya que al aumentar dicha longitud se enviarán menos CPMs al omitirse un número mayor de éstos y habrá una menor probabilidad de interferencia entre mensajes enviados por los vehículos.

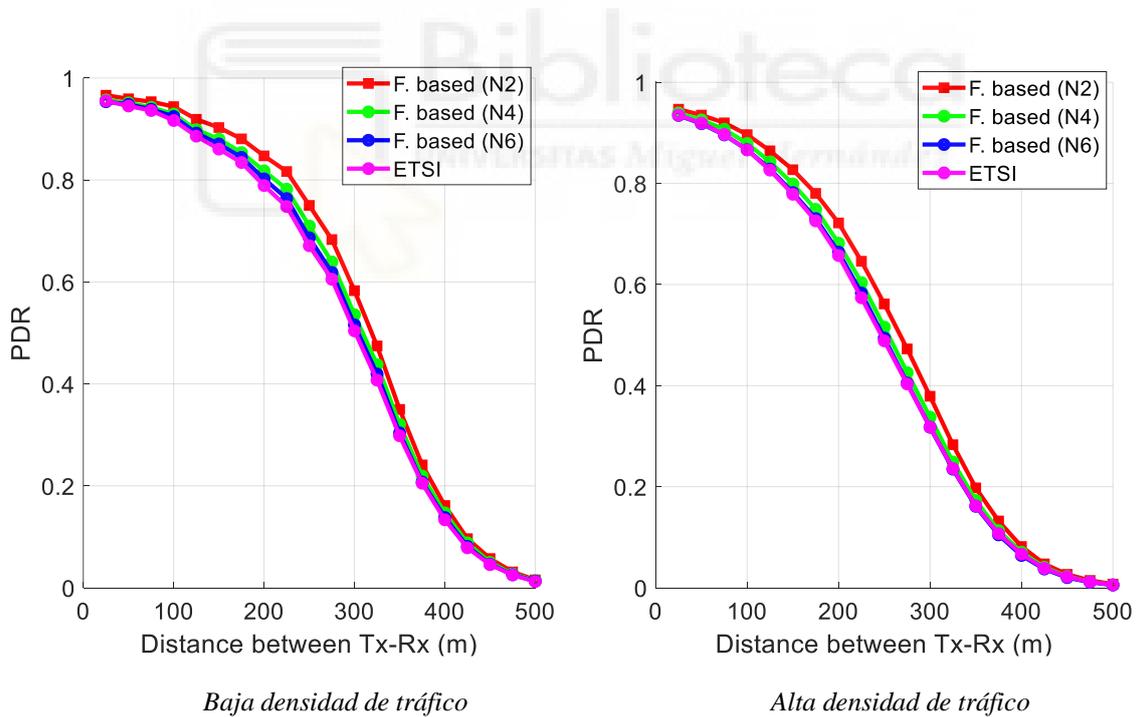


Figura 45. Ratio de entrega de paquetes con $W_Redundancy$ 0.1 s (PDR)

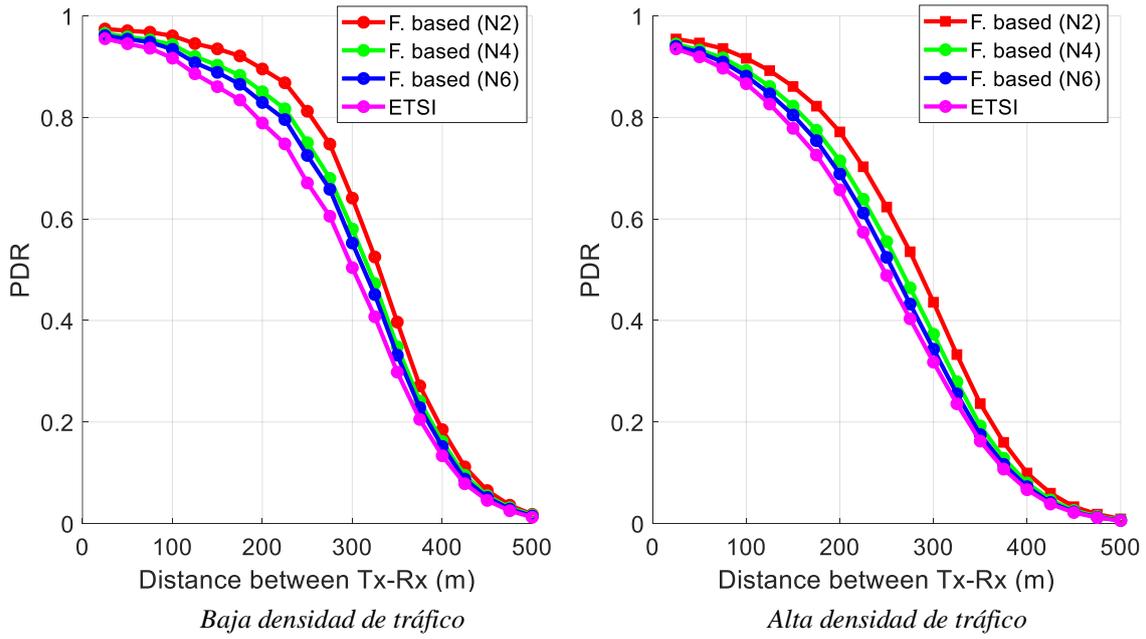


Figura 46. Ratio de entrega de paquetes con $W_{Redundancy}$ 0.2 s (PDR)

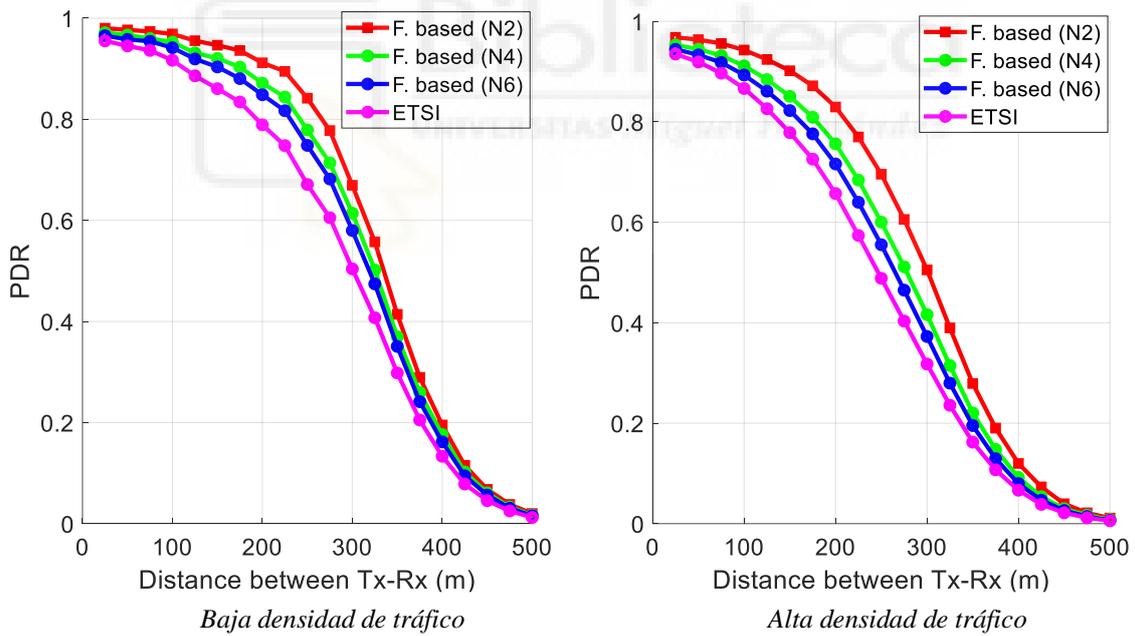


Figura 47. Ratio de entrega de paquetes con $W_{Redundancy}$ 0.3 s (PDR)

En la Figura 48 se presenta el ratio de percepción de objetos detectados con CPMs en función de la distancia entre el objeto y el vehículo que recibe los CPMs. Los resultados muestran que los objetos se perciben con alta probabilidad hasta casi los 400m para $N_{Redundancy} = 4$ y $N_{Redundancy} = 6$ en densidades bajas, y, hasta los 350 m aproximadamente para $N_{Redundancy} = 2$. Cuando la densidad aumenta, observamos como la percepción disminuye debido fundamentalmente al aumento de la carga y la interferencia en el canal. Los resultados también demuestran como al disminuir el umbral $N_{Redundancy}$ la percepción del objeto del objeto disminuye siendo las tres curvas inferiores a ETSI, esto es debido a la disminución de la redundancia del objeto detectado. Las Figuras 49 y 50 son análogas a la 48 pero variando $W_{Redundancy}$. En este caso los resultados demuestran como al aumentar la longitud de ventana $W_{Redundancy}$ disminuye la redundancia y, por lo tanto, se verá afectada la percepción.

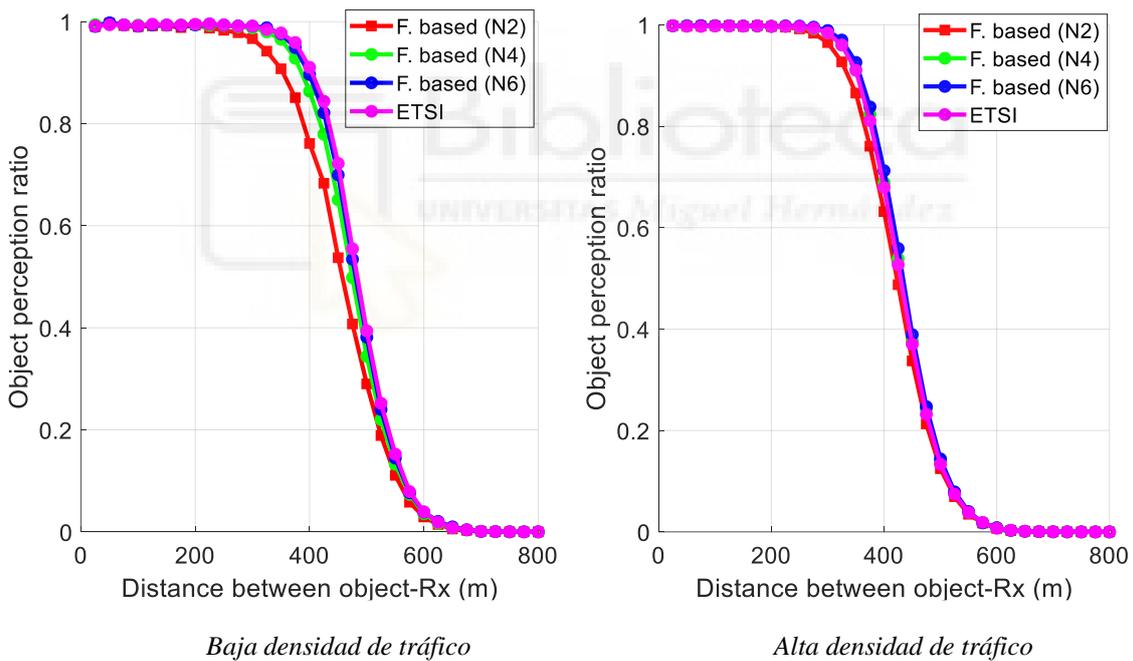


Figura 48. Ratio de percepción de objetos con $W_{Redundancy} 0.1 s$

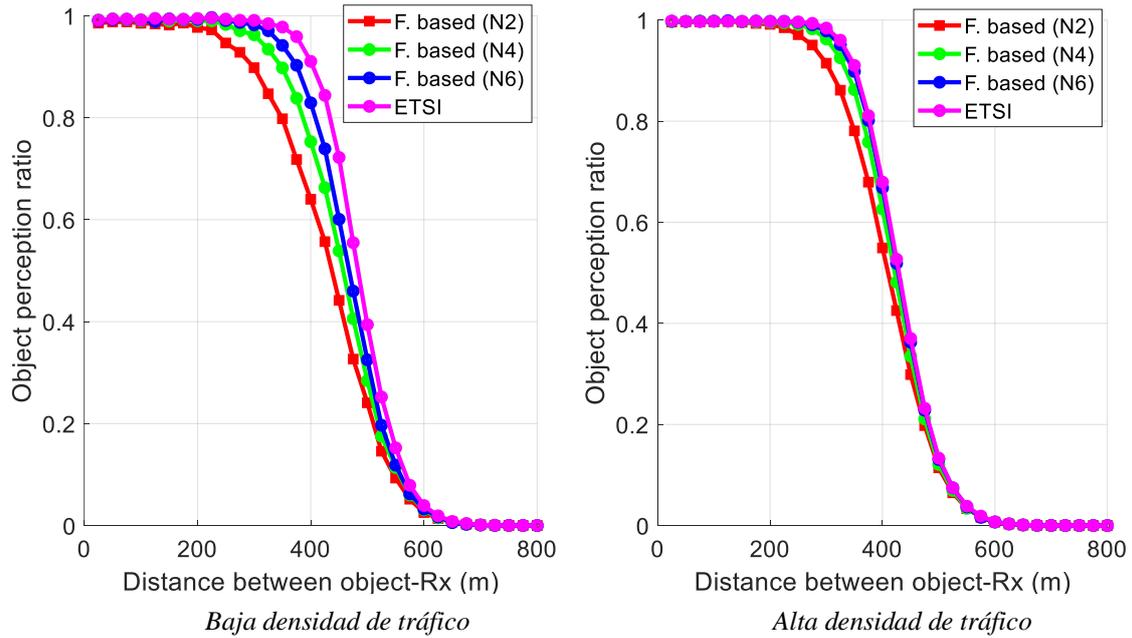


Figura 49. Ratio de percepción de objetos con $W_{Redundancy}$ 0.2 s

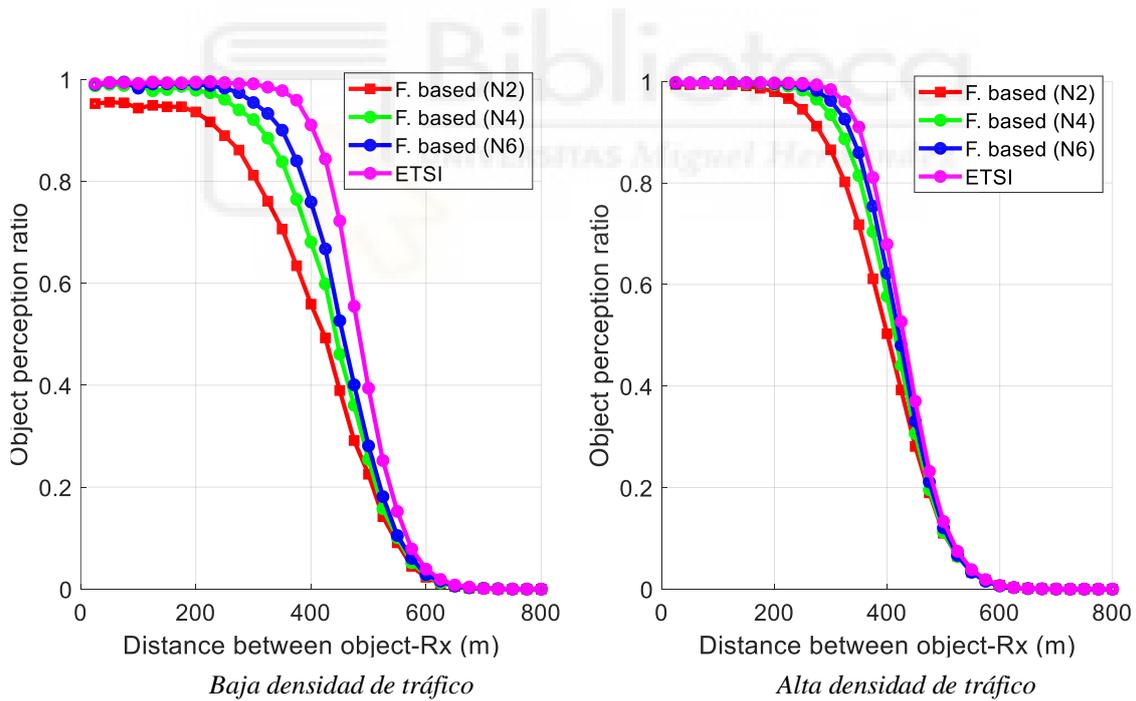


Figura 50. Ratio de percepción de objetos con $W_{Redundancy}$ 0.3 s

En la Figura 51 se presenta la redundancia experimentada en función de la distancia entre el receptor de los CPMs y el objeto. En ella se puede contemplar como al disminuir el umbral $N_{Redundancy}$ la redundancia del objeto detectado también decrece, esto es debido a que será más sencillo que se cumpla la condición de mitigación de redundancia,

ya que la variable de la cuenta del objeto alcanzará dicho umbral de forma más sencilla. En el escenario de baja densidad se detecta una menor redundancia del objeto al haber menos vehículos transmitiendo CPMs. Los resultados demuestran como para los tres valores de $N_Redundancy$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI, disminuyendo la redundancia del objeto respecto a ésta.

Las Figuras 52 y 53 son análogas a la 51 pero variando $W_Redundancy$. En este caso los resultados demuestran como al aumentar la longitud de ventana $W_Redundancy$ disminuye la redundancia del objeto debido a que al analizar un tamaño de ventana superior habrá mayor probabilidad de que se cumplan las condiciones de mitigación.

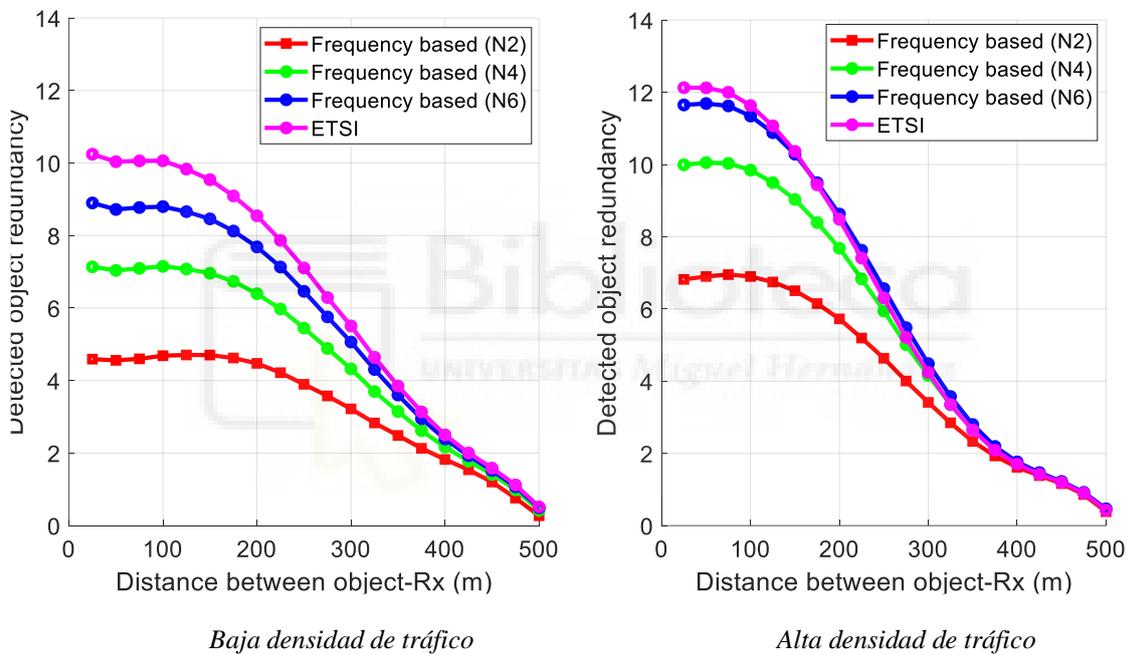


Figura 51. Redundancia del objeto detectado con $W_Redundancy$ 0.1 s

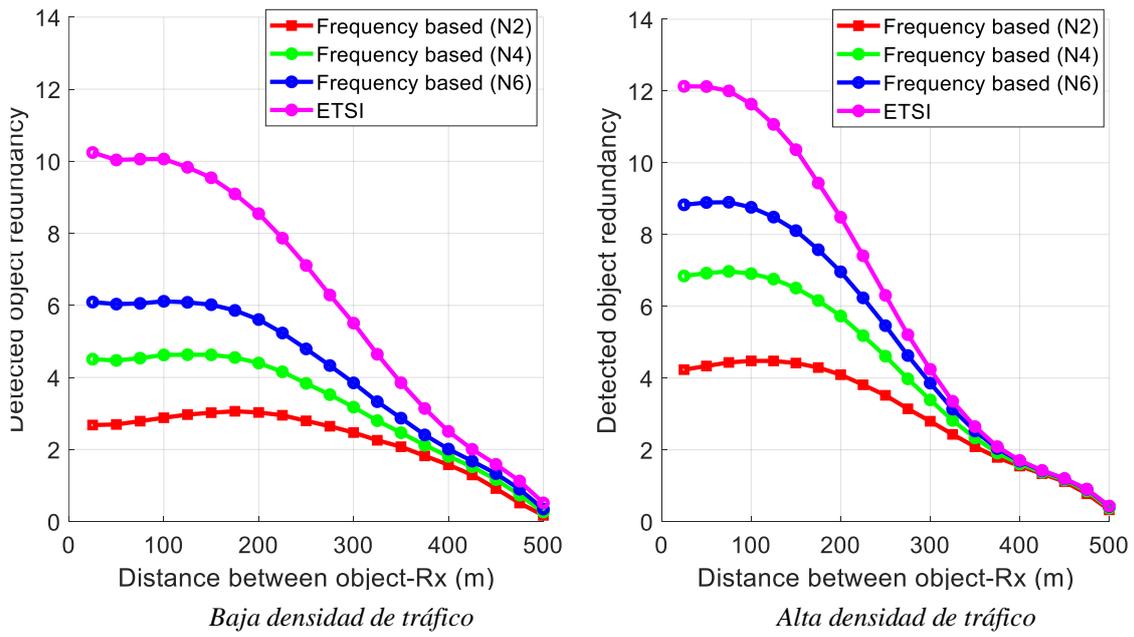


Figura 52. Redundancia del objeto detectado con $W_Redundancy$ 0.2 s

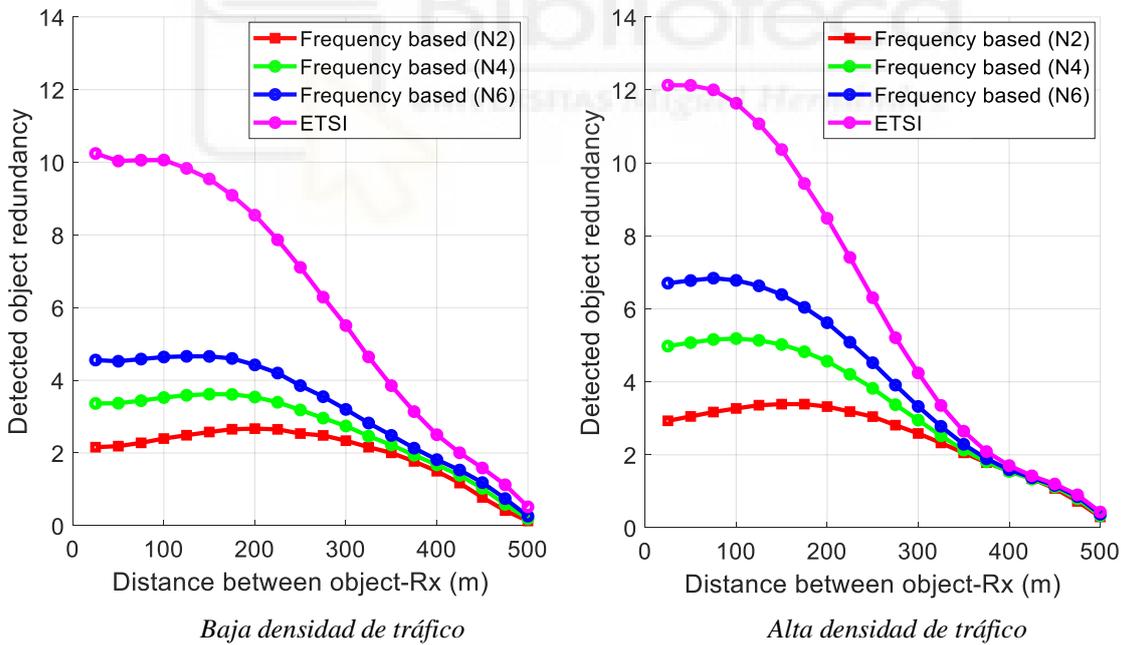


Figura 53. Redundancia del objeto detectado con $W_Redundancy$ 0.3 s

5.3.4. TÉCNICA BASADA EN AUTO ANUNCIO

A continuación, vamos a analizar los resultados obtenidos para la técnica del auto anuncio, que se basa en evitar que un CAV transmita información de un objeto si dicho objeto le ha enviado un CPM un número de veces mayor que cierto umbral cuando actuaba como transmisor, es decir, si es un CAV. En esta técnica habrá que tener en cuenta varios parámetros para llevar a cabo una menor o mayor inserción, nos referimos a que habrá que fijarse en $N_Redundancy$, $W_Redundancy$. Antes de comenzar a explicar las figuras cabe destacar que se han omitido algunas simulaciones para ciertos valores de $N_Redundancy$ y $W_Redundancy$ como son: $N_Redundancy = 2$ y $W_Redundancy = 0.1s$ no vale la pena estudiarlos porque los vehículos transmiten como máximo 10 CPMs por segundo (1 CPM cada 0.1 s), por lo tanto, nunca vamos a recibir dos CPMs transmitidos por un coche en 0.1 segundos; $N_Redundancy = 3$ y $W_Redundancy = 0.1s$ es análogo al caso anterior, no vale la pena estudiarlos porque los vehículos transmiten como máximo 10 CPMs por segundo, por lo tanto, nunca vamos a recibir tres CPMs transmitidos por un coche en 0.1 segundos; $N_Redundancy = 3$ y $W_Redundancy = 0.2s$ no vale la pena estudiarlos porque los vehículos transmiten como máximo 10 CPMs por segundo (2 CPM cada 0.2 s), por lo tanto, nunca vamos a recibir tres CPMs transmitidos por un coche en 0.2 segundos.

En la Figura 54 se presenta la PDF del número de objetos que se insertan en cada CPM para las dos densidades de tráfico estudiadas. En ella podemos observar cómo al incrementar el umbral $W_Redundancy$ disminuye el número de objetos en un CPM, esto es debido a que se analizará un mayor historial de objetos pudiendo así cumplir más fácilmente la condición de mitigación. En el escenario de alta densidad observamos cómo hay un mayor número de objetos en cada CPM al haber un mayor número de vehículos en el escenario.

Los resultados demuestran como para los tres valores de $W_Redundancy$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI, dejando de obtener porcentajes muy superiores para un alto número de objetos en un CPM y siendo prácticamente nulas para ambas densidades a partir de 5 objetos.

La Figura 55 es análoga a la 54 pero variando $N_Redundancy$. Los resultados también demuestran como al aumentar $N_Redundancy$ aumentará el número de objetos que

alberga un CPM, ya que la variable de *Sender_count* tendrá más dificultad en alcanzar este umbral de $N_{Redundancy} = 2$. La Figura 56 se explica más abajo.

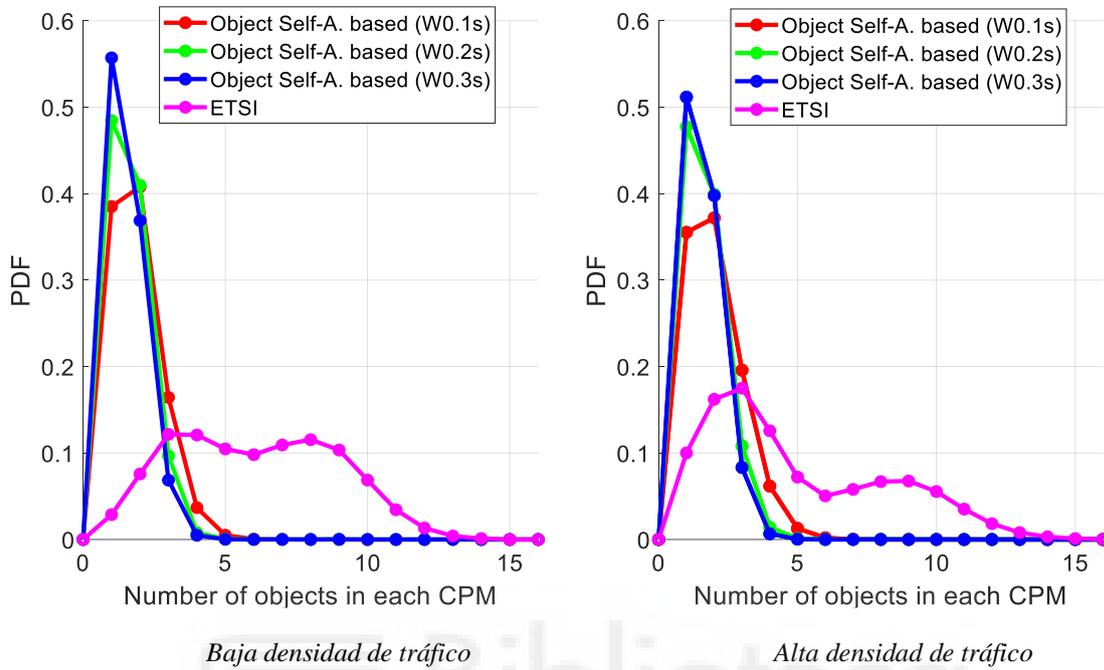


Figura 54. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con N1

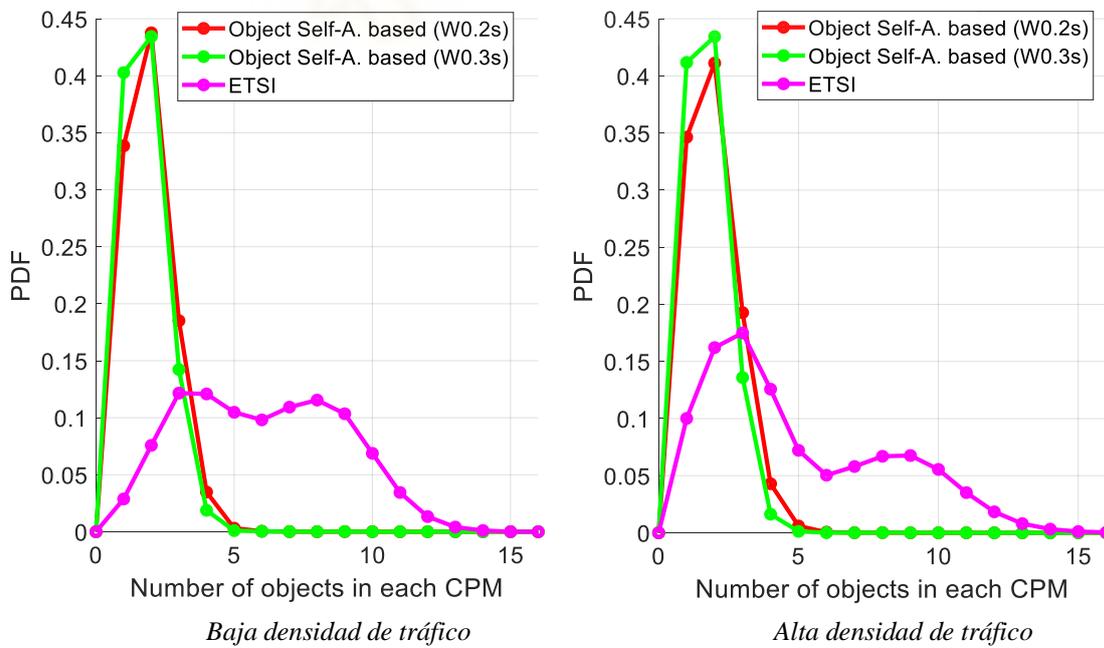


Figura 55. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con N2

La Figura 56 la vamos a analizar por separado al variar $N_Redundancy$ en ella en vez de $W_Redundancy$. En ella podemos observar cómo al aumentar $N_Redundancy$ crece también el número de objetos en cada CPM, esto se debe a que la variable de $Sender_count$ tendrá más dificultad en alcanzar este umbral de $N_Redundancy$ como hemos comentado anteriormente.

Los resultados demuestran como para los tres valores de $N_Redundancy$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI, dejando de obtener porcentajes muy superiores para un alto número de objetos en un CPM y siendo nulas para ambas densidades a partir de 5 objetos.

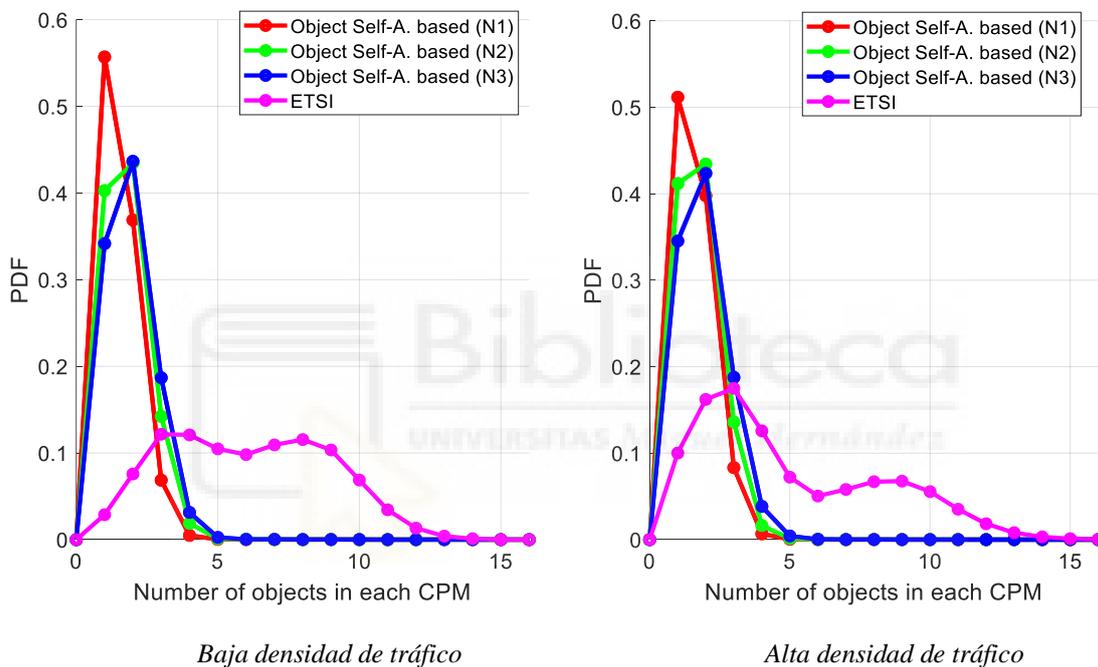


Figura 56. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con $W_Redundancy$ 0.3 s

En la Figura 57 se presenta la PDF del número de CPMs que genera cada vehículo por segundo para las dos densidades de tráfico estudiadas. En ella se puede contemplar como al aumentar el umbral $W_Redundancy$ disminuye la probabilidad de que los vehículos generen CPMs a 10 Hz casi todo el tiempo sobre todo a baja densidad de tráfico, ya que los vehículos circulan a mayor velocidad. Por lo tanto, el CAV transmisor analizará un segmento mayor del historial de CPMs recibidos y podrá cumplir de manera más sencilla la condición de mitigación del objeto disminuyendo así el número de CPMs que se generan por segundo. En el escenario de alta densidad observamos cómo hay un mayor número de objetos en cada CPM al haber un mayor número de vehículos en el escenario.

Los resultados demuestran como para los tres valores de $W_Redundancy$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI, disminuyendo los altos porcentajes de que los vehículos generen CPMs a 10 Hz. La Figura 58 es análoga a la 57 pero variando $N_Redundancy$. Los resultados también demuestran como al aumentar $N_Redundancy$ aumentará el número de CPMs generados por segundo, ya que la variable de $Sender_count$ tendrá más dificultad en alcanzar este umbral de $N_Redundancy = 2$. La Figura 59 se explica más abajo.

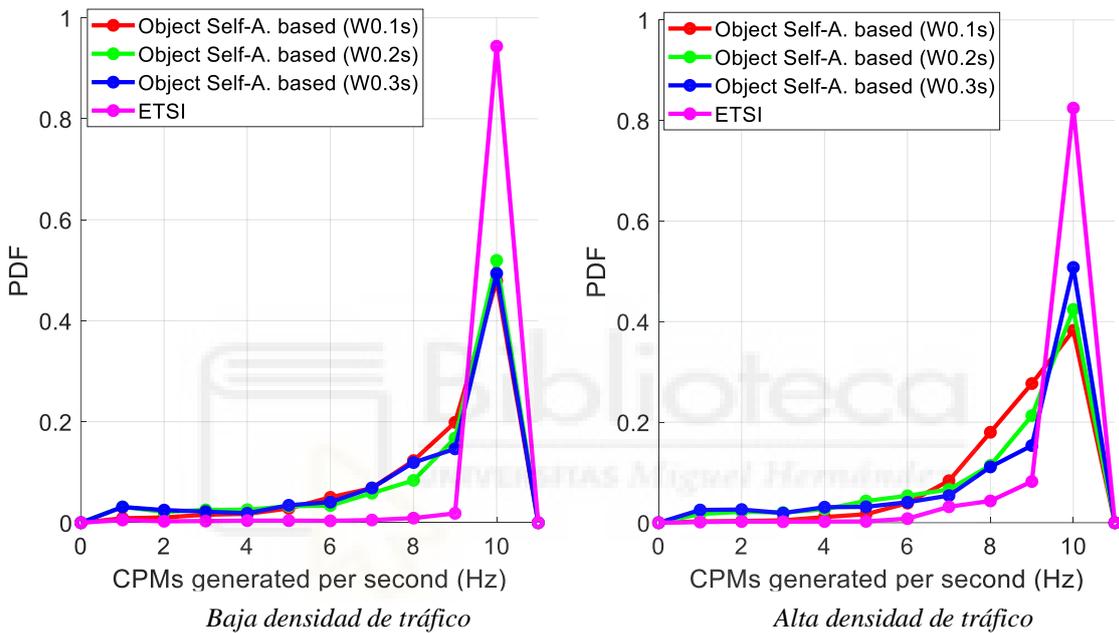


Figura 57. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con $N1$

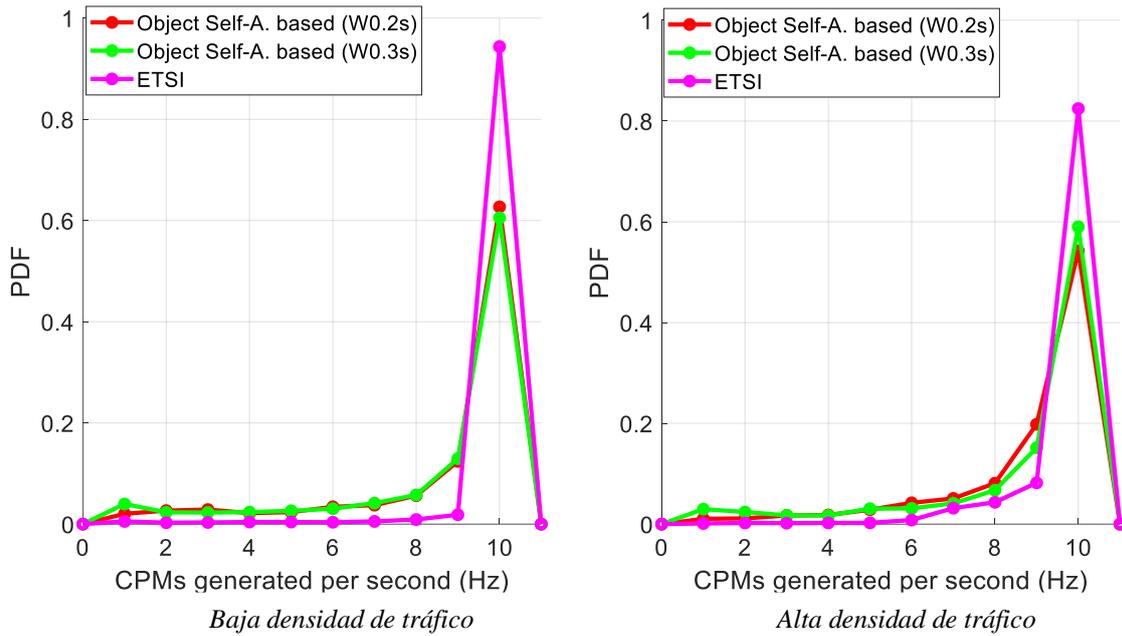


Figura 58. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con N2

La figura 59 la vamos a analizar por separado al variar $N_{Redundancy}$ en ella en vez de $W_{Redundancy}$. En ella podemos observar como al aumentar $N_{Redundancy}$ crece el porcentaje de generación de CPMs por segundo hacia valores altos, esto se debe a que la variable de $Sender_count$ tendrá más dificultad en alcanzar este umbral de $N_{Redundancy}$ como hemos comentado anteriormente.

Los resultados demuestran como para los tres valores de $N_{Redundancy}$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI, dejando de obtener porcentajes muy superiores de 10 CPMs generados por segundo sobre todo para $N_{Redundancy} = 1$.

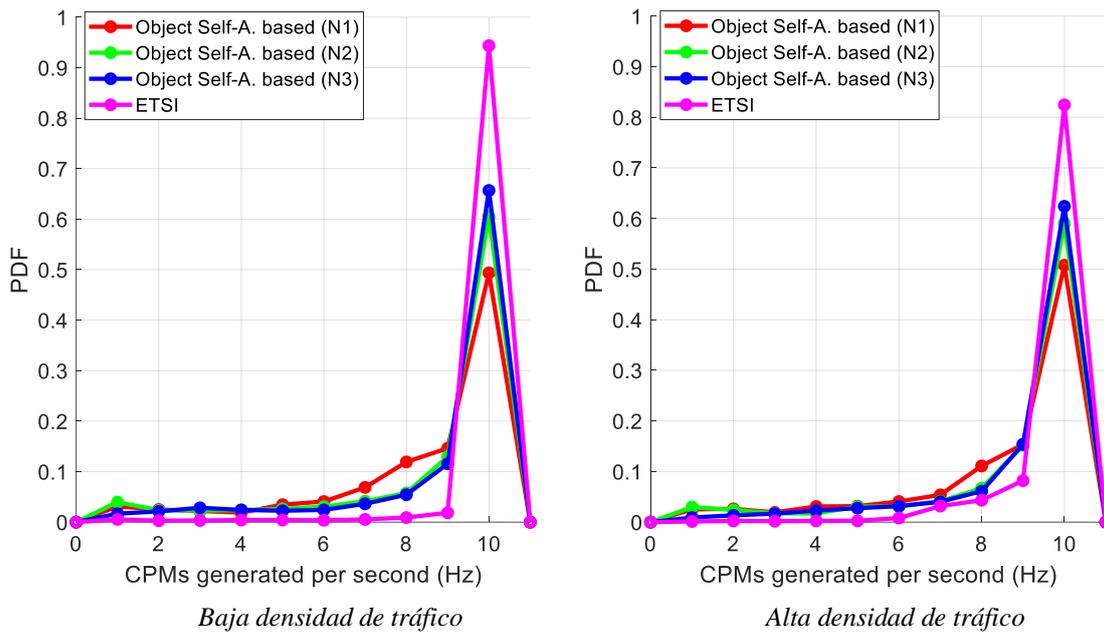


Figura 59. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con $W_{Redundancy}$ 0.3 s

En la Tabla 9 se presenta el nivel de CBR que representa el porcentaje de tiempo que un vehículo detecta el canal como ocupado. Los resultados obtenidos muestran que la CBR aumenta cuando se incrementa la densidad del tráfico, esto se debe a que hay un mayor número de vehículos transmitiendo cuando la densidad es alta. Podemos destacar como norma general, que cuando $N_{Redundancy}$ alcanza el valor mínimo y $W_{Redundancy}$ el valor máximo se obtiene un menor porcentaje de CBR como se esperaba. Los resultados de esta tabla demuestran como para todos los valores de $N_{Redundancy}$ y $W_{Redundancy}$ y para ambas densidades de tráfico se reduce el CBR respecto a ETSI, el cual era de 27.48% para baja densidad y de 45.16% para alta densidad.

Densidad de Tráfico	$N_{Redundancy}$	CBR (%)		
		$W_{Redundancy}$ 0.1 (s)	$W_{Redundancy}$ 0.2 (s)	$W_{Redundancy}$ 0.3 (s)
Baja	1	18.43	17.31	16.76
	2	n.a.	18.58	17.93
	3	n.a.	n.a.	18.74
Alta	1	34.43	31.78	31.25
	2	n.a.	34.40	33.10
	3	n.a.	n.a.	34.64

Tabla 9. Ratio de ocupación del canal para la técnica del Auto anuncio (CBR). En la tabla n.a. significa "no analizado"

En la Figura 60 se presenta la PDR o tasa de paquetes recibidos en función de la distancia entre transmisor y receptor para las dos densidades de tráfico estudiadas. Se puede contemplar como al aumentar la longitud de ventana $W_Redundancy$ aumentará el PDR, ya que al aumentar dicha longitud se enviarán menos CPMs al omitirse un número mayor de éstos y habrá una menor probabilidad de interferencia entre mensajes enviados por los vehículos. Los resultados demuestran como para los tres valores de $W_Redundancy$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI, disminuyendo la redundancia en el canal al aplicar la técnica, y, mejorando así el ratio de paquetes entregados.

La Figura 61 es análogas a la 60 pero variando $N_Redundancy$. Los resultados también demuestran como al aumentar $N_Redundancy$ disminuye ligeramente la PDR, esto se debe a que la variable de $Sender_count$ tendrá más dificultad en alcanzar este umbral de $N_Redundancy = 2$ como hemos comentado anteriormente. La Figura 62 se explica más abajo.

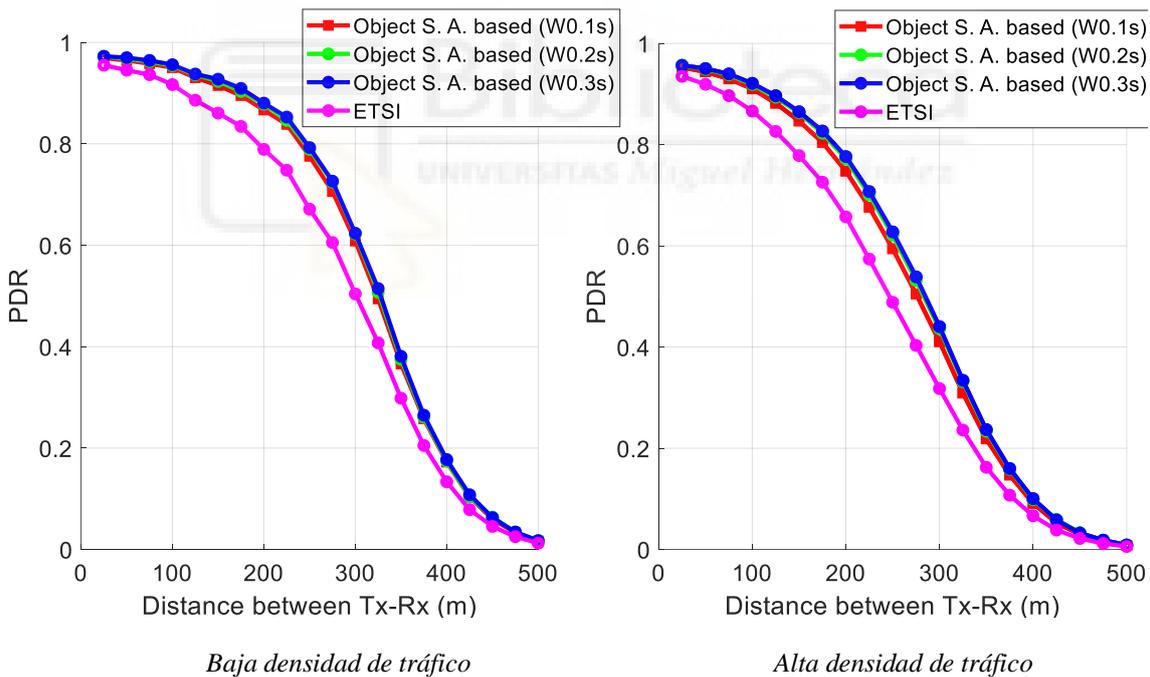


Figura 60. Ratio de entrega de paquetes con NI (PDR)

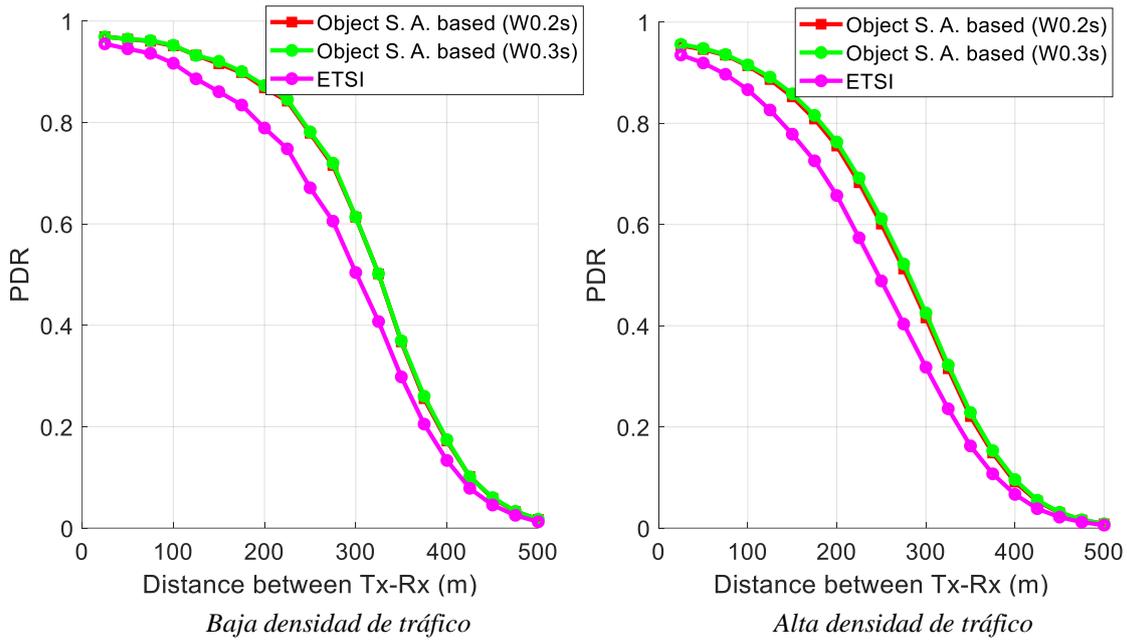


Figura 61. Ratio de entrega de paquetes con N2 (PDR)

La figura 62 la vamos a analizar por separado al variar $N_{Redundancy}$ en ella en vez de $W_{Redundancy}$. En ella podemos observar cómo al aumentar $N_{Redundancy}$ decrece la PDR, esto se debe a que la variable de $Sender_count$ tendrá más dificultad en alcanzar este umbral de $N_{Redundancy}$ como hemos comentado anteriormente.

Los resultados demuestran como para los tres valores de $N_{Redundancy}$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI.

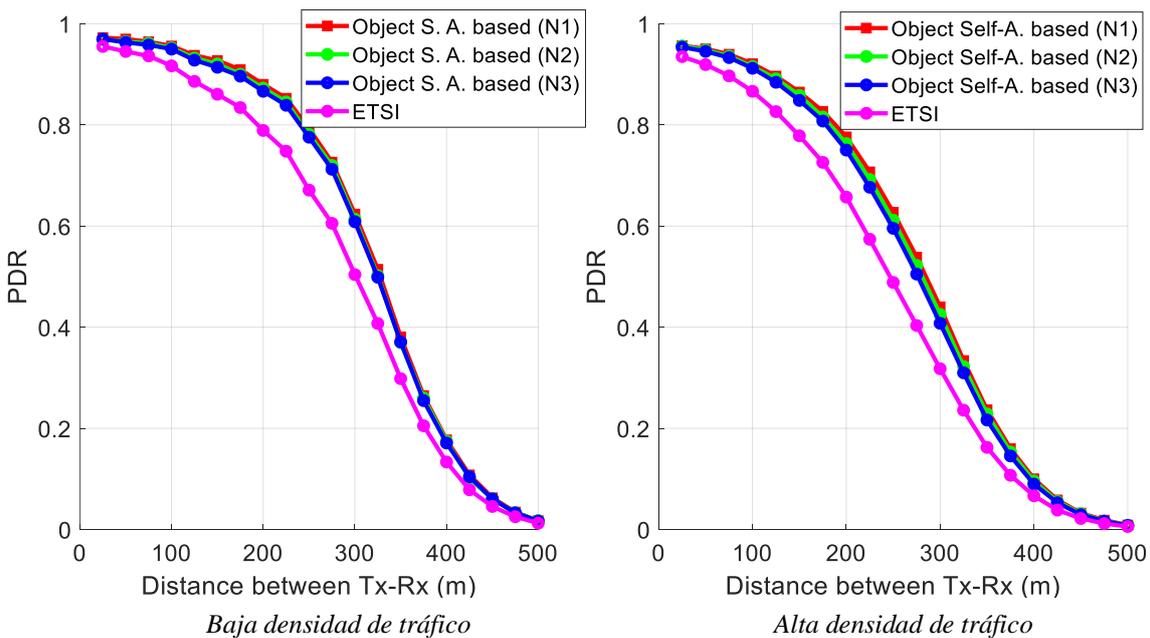


Figura 62. Ratio de entrega de paquetes con $W_{Redundancy}$ 0.3 s (PDR)

En la Figura 63 se presenta el ratio de percepción de objetos detectados con CPMs en función de la distancia entre el objeto y el vehículo que recibe los CPMs. Los resultados demuestran que los objetos se perciben con una probabilidad sobre el 95% hasta los 200m en baja densidad de tráfico para $W_Redundancy = 0.1$ s y siendo muy inferior para $W_Redundancy = 0.2$ s y $W_Redundancy = 0.3$ s. Para baja densidad de tráfico podemos observar como las percepciones son bastante bajas respecto a alta densidad, esto se debe a que al ir los vehículos más rápido se utiliza un tiempo de ventana menor para recibir un objeto como correctamente detectado, lo que hace que se reciban menos CPMs al ser la ventana más pequeña y por ello descenderá la percepción del objeto. Por otro lado, para alta densidad los vehículos irán más lentos y la ventana será más larga por lo que tendremos una mayor probabilidad de recibir un CPM con información del objeto dentro de ella mejorando así la percepción del objeto. Los resultados también demuestran como al aumentar $W_Redundancy$ la percepción del objeto disminuye siendo las tres curvas inferiores a ETSI, esto se debe a que al aumentar dicho umbral la redundancia del objeto detectado decrece respecto a ETSI, por lo tanto, al disminuir esto también se verá afectada la percepción en esta técnica. La Figura 64 es análoga a la 63 pero variando $N_Redundancy$. Los resultados también demuestran como al aumentar $N_Redundancy$ aumenta la percepción del objeto, esto se debe a que la variable de $Sender_count$ tendrá más dificultad en alcanzar este umbral de $N_Redundancy = 2$ y eliminando así menos objetos de los CPMs. La Figura 65 se explica más abajo.

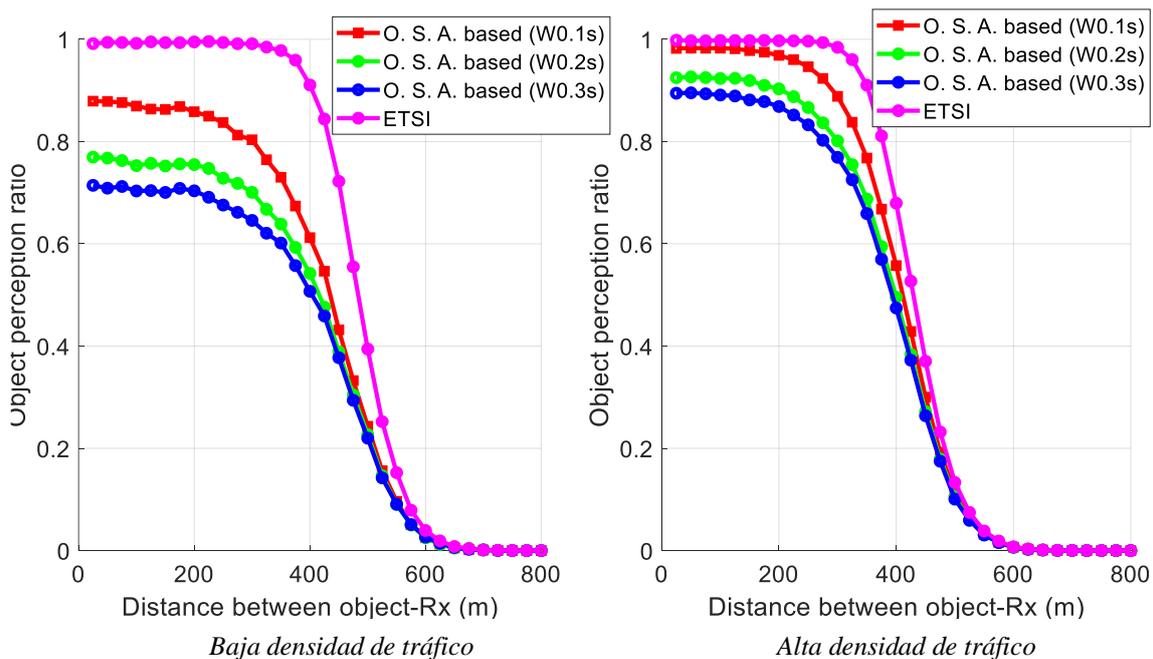


Figura 63. Ratio de percepción de objetos con NI

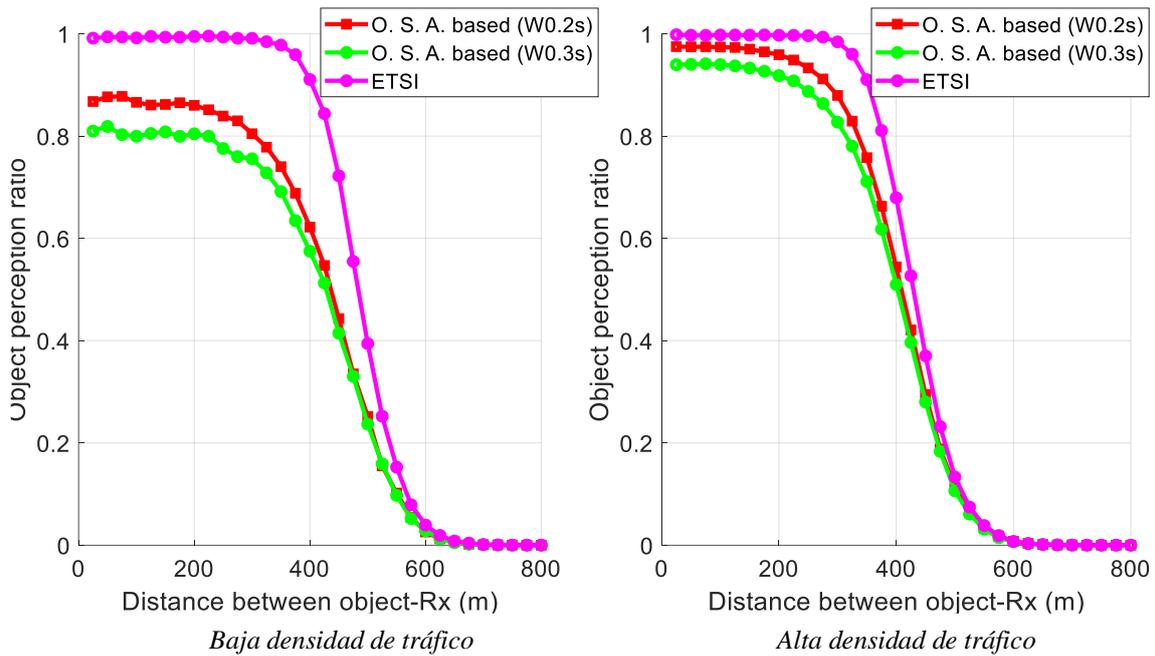


Figura 64. Ratio de percepción de objetos con N2

La figura 65 la vamos a analizar por separado al variar $N_{Redundancy}$ en ella en vez de $W_{Redundancy}$. En ella podemos observar cómo al aumentar $N_{Redundancy}$ crece la percepción del objeto, esto se debe a que la variable de $Sender_count$ tendrá más dificultad en alcanzar este umbral de $N_{Redundancy}$ y se omitirán menos objetos de los CPMs dando así una mayor percepción. Los resultados demuestran como para los tres valores de $N_{Redundancy}$ las tres curvas empeoran a ETSI, a costa de reducir la redundancia de objetos.

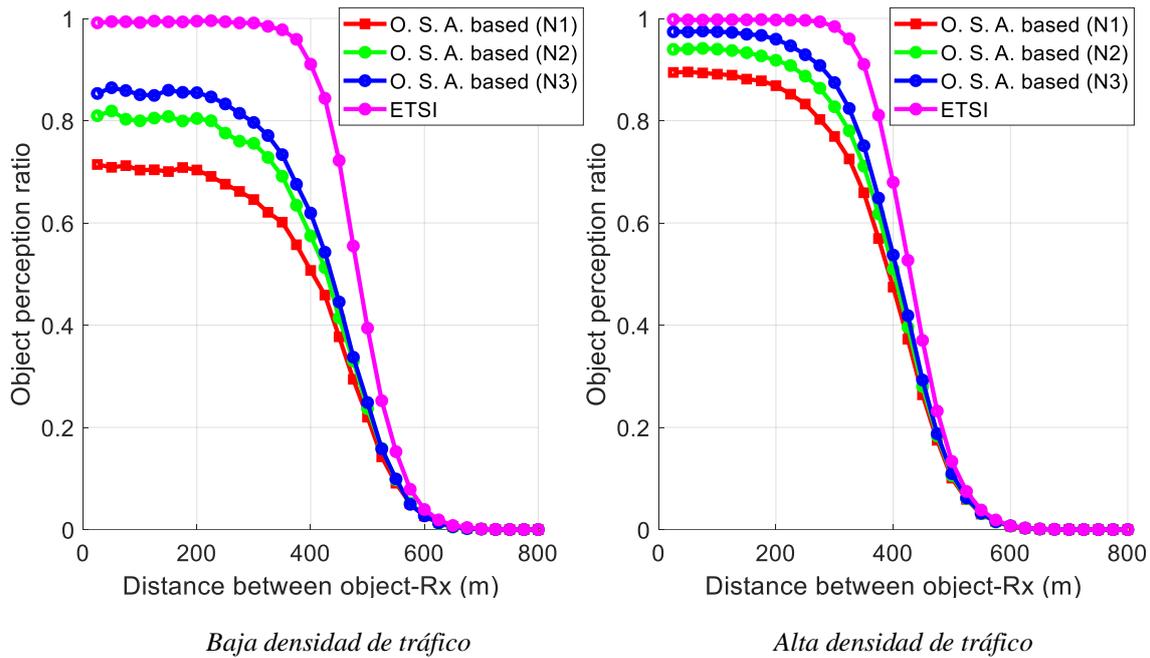


Figura 65. Ratio de percepción de objetos con $W_Redundancy$ 0.3 s

En la Figura 66 se presenta la redundancia experimentada en función de la distancia entre el receptor de los CPMs y el objeto. En ella se puede contemplar como cuando aumenta $W_Redundancy$ la redundancia del objeto detectado disminuye, esto es debido a que será más sencillo que se cumpla la condición de mitigación de redundancia al analizar un tamaño de ventana mayor de objetos. Como norma general, podemos observar cómo esta redundancia aumenta al mismo tiempo que lo hace el CBR del canal. Para los tres valores de $W_Redundancy$ las tres curvas obtienen una menor redundancia respecto a ETSI, con lo que se puede deducir como la técnica afecta a la mitigación de los objetos. En el escenario de alta densidad habrá mayor redundancia al haber un mayor número de vehículos transmitiendo. La Figura 67 es análoga a la 66 pero variando $N_Redundancy$. Los resultados también demuestran como al aumentar $N_Redundancy$ aumenta la redundancia del objeto detectado, esto se debe a que la variable de $Sender_count$ tendrá más dificultad en alcanzar este umbral de $N_Redundancy = 2$ y eliminando así menos objetos de los CPMs. La Figura 68 se explica más abajo.

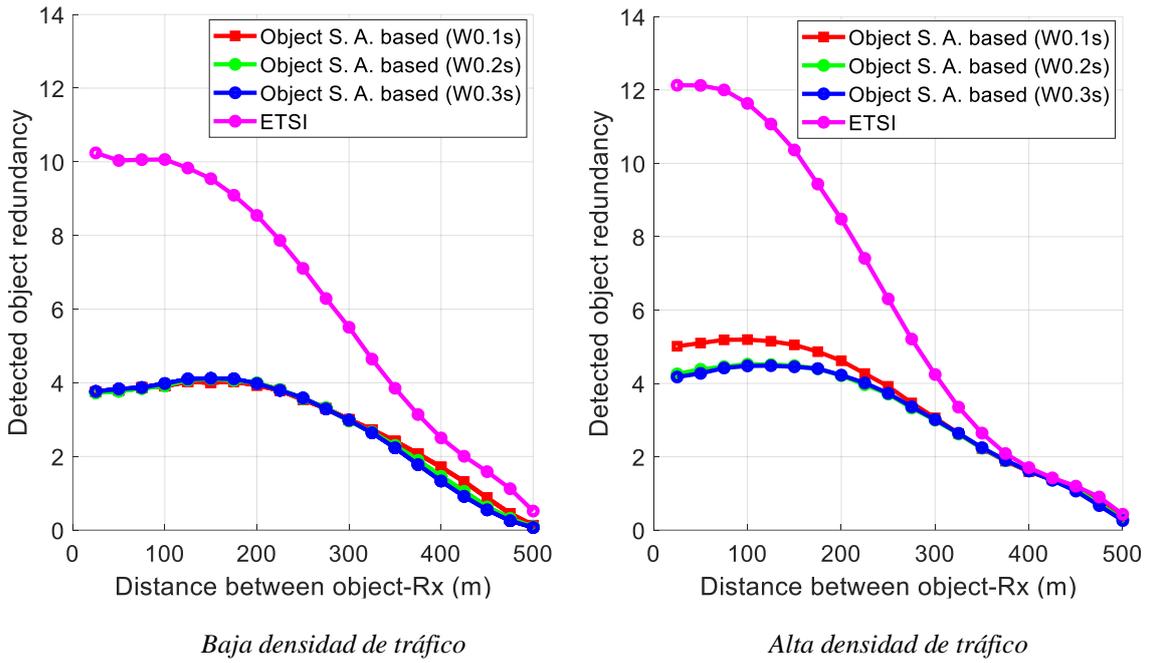


Figura 66. Redundancia del objeto detectado con N1

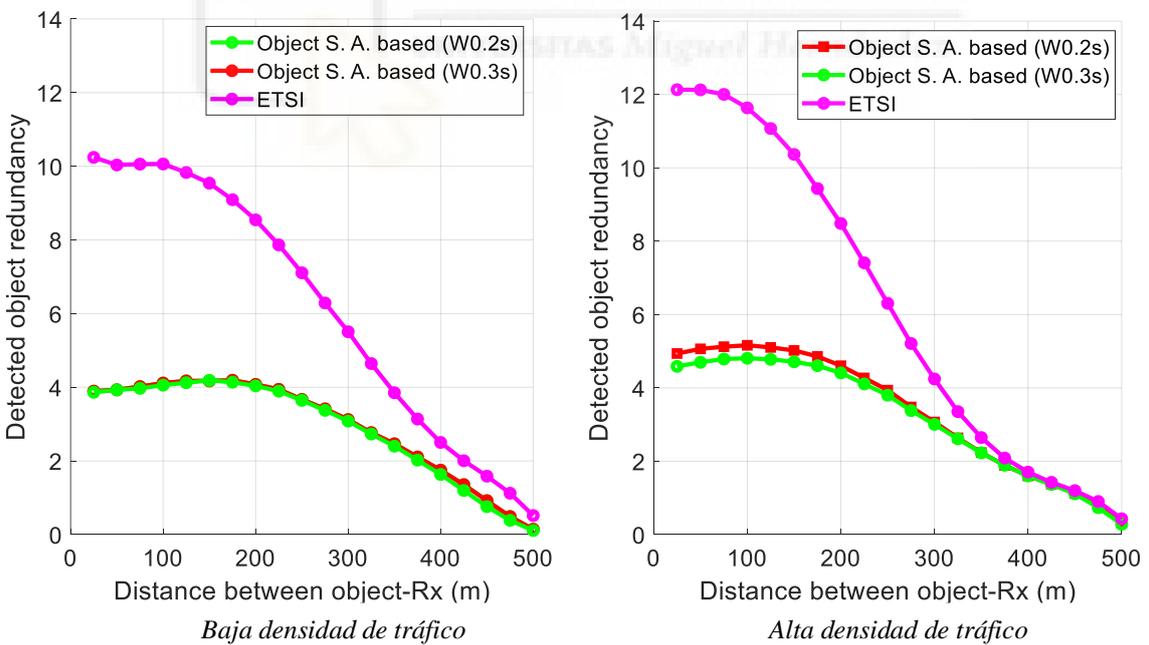


Figura 67. Redundancia del objeto detectado con N2

La figura 68 la vamos a analizar por separado al variar $N_Redundancy$ en ella en vez de $W_Redundancy$. En ella podemos observar cómo al aumentar $N_Redundancy$ crece la redundancia del objeto para ambas densidades. En el escenario de alta densidad las tres curvas se igualan a partir de los 300 metros. Que la redundancia del objeto crezca al aumentar $N_Redundancy$ se debe a que la variable de $Sender_count$ tendrá más dificultad en alcanzar el umbral de $N_Redundancy$ y se omitirán menos objetos de los CPMs dando así una mayor redundancia.

Los resultados demuestran como para los tres valores de $N_Redundancy$ las tres curvas mejoran considerablemente a ETSI.

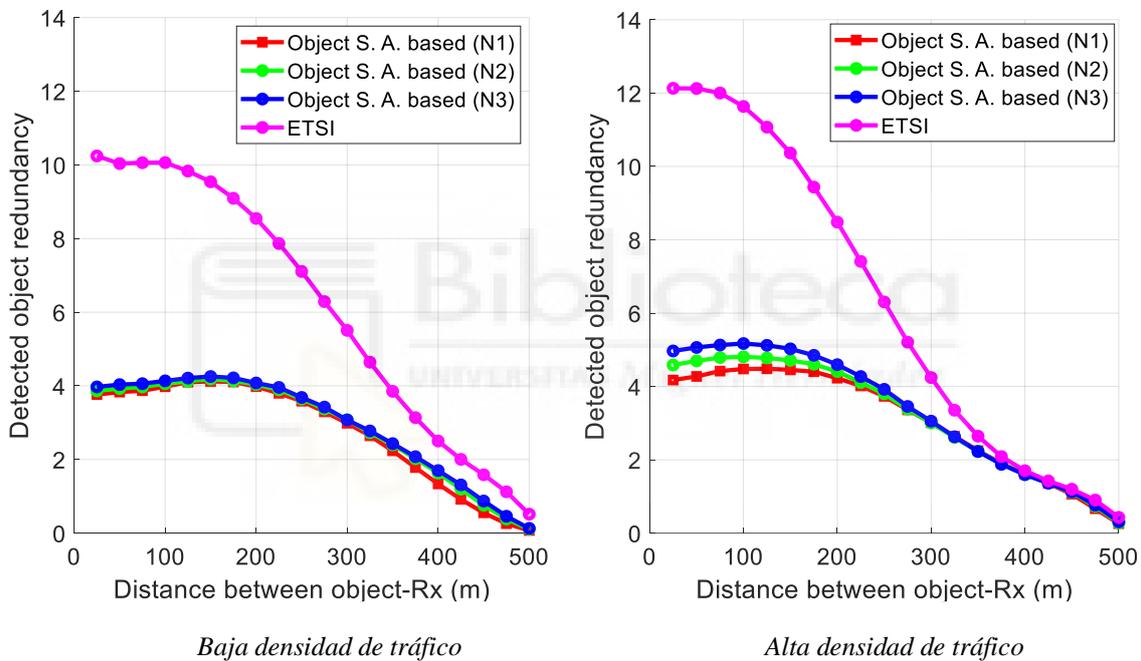


Figura 68. Redundancia del objeto detectado con $W_Redundancy$ 0.3 s

5.3.5. DISCUSIÓN

El objeto del presente punto, se basa en comparar conjuntamente los resultados obtenidos del CBR y de la percepción del objeto para ver qué técnica se puede comportar mejor en las simulaciones realizadas, y por ello, disponer de un punto de partida para futuras simulaciones. No parece claro en el proceso de estandarización que se vaya a decidir por una técnica en concreto, así que, a continuación, procederemos a intentar dar algo de luz sobre este tema unificando los resultados obtenidos en las gráficas y tablas anteriores.

Primero, cabe destacar que se ha elegido para la técnica de la Dinámica vehicular y para la del Auto anuncio las curvas que obtenían mejores resultados en función de la percepción y redundancia del objeto. Por otro lado, se han elegido parámetros intermedios para la técnica de la Distancia y de la Frecuencia, ya que también obtenían un buen balance entre la redundancia y la percepción del objeto.

En primer lugar, en la figura 69 se puede observar que cuando hay una baja densidad de tráfico la que genera menos redundancia de objetos es la técnica del Auto anuncio, por otro lado, la que más genera es la de la Distancia.

En cambio, cuando hay una alta densidad de tráfico la que genera menos redundancia de objetos es la técnica de la Dinámica, y la que más genera sería la de la Frecuencia. Cabe destacar que esto solo es orientativo, ya que es muy importante tener en cuenta la percepción del objeto de cada una de las técnicas para satisfacer la seguridad en la vía.

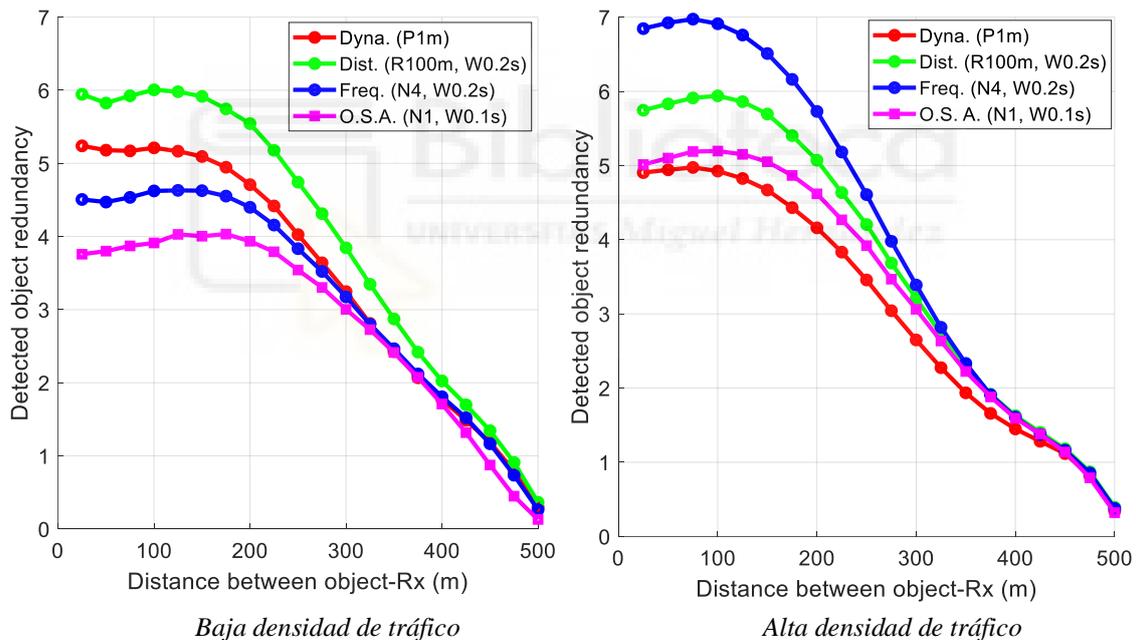


Figura 69. Redundancia del objeto detectado para las cuatro técnicas

En segundo lugar, en la Tabla 10, podemos observar los valores más bajos del CBR, con parámetros con los que se ha obtenido la mejor percepción. Estos CBRs en consecuencia ofrecen percepciones superiores al 95% hasta los 300m para la técnica de la Distancia, Dinámica y Frecuencia en los escenarios con baja densidad de tráfico, por otro lado, para escenarios con alta densidad también se supera una percepción del 95% para estas tres técnicas, aunque descendiendo la distancia hasta unos 270-275m aproximadamente.

También podemos apreciar, que para escenarios con baja densidad la técnica de la dinámica y la de la frecuencia obtienen un CBR muy similar, variando más para escenarios de alta densidad.

Aunque lo anterior nos pueda servir como punto de partida, no hay que descartar la modificación de los diferentes parámetros de cada técnica dependiendo de las condiciones el escenario en el que nos encontremos, ya que dispondremos de diferentes situaciones en las cuales nos podría interesar más mejorar un campo u otro. Por ejemplo, puede que nos encontremos con un escenario en el que solo se pretenda obtener altas percepciones hasta los 200m, por lo tanto, en este caso sería conveniente modificar los parámetros, cambiando a su vez en gran forma el CBR de este escenario.

<i>Densidad de Tráfico</i>	<i>CBR (%)</i>			
	<i>Dinámica vehicular (P1m, S0.5 m/s)</i>	<i>Distancia (R100m, W0.2s)</i>	<i>Frecuencia (N4, W0.2s)</i>	<i>Auto anuncio (N1, W0.1s)</i>
Baja	20.50	22.41	20.58	18.43
Alta	31.71	35.56	34.15	34.43

Tabla 10. CBR para las cuatro técnicas con baja y alta densidad de tráfico

En tercer lugar, en la figura 70 se puede observar que cuando hay una baja densidad de tráfico la técnica de la Dinámica y Distancia son bastante similares y son las que mejores valores obtienen, siendo algo mejor la primera hasta unos 380 metros aproximadamente y comportándose algo mejor la segunda a partir de esta distancia. Ambas dejan por debajo a la técnica de la Frecuencia que tampoco tiene un mal comportamiento. La técnica del Auto anuncio es bastante inferior debido a que elimina cualquier objeto detectado de un CPM si dicho objeto le ha enviado información de un objeto anteriormente cuando actuaba como un transmisor, es decir, si es un CAV.

En cambio, cuando hay una alta densidad de tráfico la técnica de la Dinámica y de la Frecuencia son prácticamente idénticas y son las que mejores valores obtienen, dejando algo por debajo a la de la Distancia que se va igualando con estas dos a la vez que aumenta la distancia. La técnica del Auto anuncio vuelve a ser la que peor percepción obtiene, aunque mejora de una manera considerable respecto al escenario de baja densidad de tráfico debido a que los vehículos irán más lentos y la ventana será más larga por lo que tendremos una mayor probabilidad de recibir un CPM con información del objeto dentro de ella mejorando así la percepción del objeto.

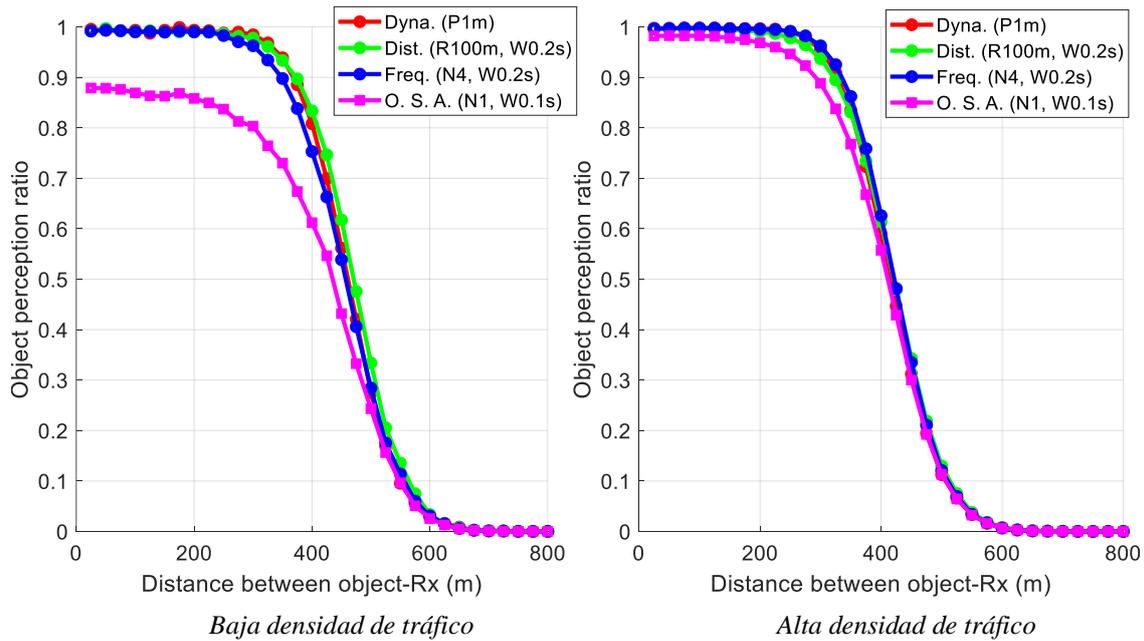


Figura 70. Ratio de percepción de objetos para las cuatro técnicas

Para concluir, cabe destacar que en términos de CBR y de percepción del objeto la mejor técnica sería la de la Dinámica tanto para escenarios con baja o alta densidad de tráfico. La siguiente que obtiene un menor CBR junto con una buena percepción, sobre todo en escenarios de alta densidad, sería la técnica de la frecuencia. Después le seguiría la técnica de la Distancia que, aunque obtiene peores valores de CBR para los escenarios de baja y alta densidad de tráfico, a largas distancias obtiene una percepción del objeto ligeramente superior a las dos técnicas anteriores lo que hace que sea una opción a tener en cuenta. Por último, la técnica del Auto anuncio es la que menor CBR obtiene en escenarios de baja densidad, aunque está muy limitada en términos de percepción, lo que haría que no se tuviera en cuenta.

5.4. ESTUDIO EN ESCENARIO MIXTO

En este punto, efectuaremos un análisis en profundidad de los resultados obtenidos en escenarios mixtos, en los que diferentes vehículos emplean diferentes técnicas de mitigación de redundancia. En el proceso de estandarización de ETSI, no parece claro que vaya a decidirse por una o por otra técnica, sino que se establecerán unos requisitos mínimos de redundancia que todo fabricante deberá cumplir. Si este fuera el caso, en la práctica podríamos tener vehículos en circulación de diferentes fabricantes, cada uno de ellos empleando una técnica de mitigación de redundancia diferente. En este apartado

analizaremos diferentes escenarios para estudiar el rendimiento del sistema, ya que la forma en la que un vehículo genere sus CPMs influye a los demás, no solo en la percepción, sino en la propia generación de CPMs al emplear técnicas de mitigación de redundancia.

En la práctica podrán darse multitud de escenarios con proporciones de vehículos empleando unas técnicas u otras. El estudio lo hemos limitado a dos escenarios. En el primero, cada vehículo en circulación emplea una de las 4 técnicas estudiadas en este trabajo, teniendo un 25% de los vehículos empleando cada una de dichas 4 técnicas. En el segundo, solo consideramos las técnicas basadas en la distancia y la frecuencia, de forma que el 50% de los vehículos utilizan una de ellas y el resto la otra. El escenario de las cuatro técnicas al 25% se ha elegido para observar el comportamiento al simular un escenario con multitud de técnicas simultáneas. Para llevarlo a cabo, se han utilizado parámetros intermedios de cada una de las variables de las cuatro técnicas como son: *R_Redundancy* en 100 m y *W_Redundancy* 0.2 s para la técnica de la Distancia; *N_Redundancy* en 4 y *W_Redundancy* en 0.2 s para la técnica de la Frecuencia; *P_Redundancy* en 1 m y *S_Redundancy* en 0.5 m/s para la técnica de la Dinámica vehicular; *N_Redundancy_Osa* en 2 (nueva variable que se le ha dado a la técnica del Auto anuncio para poder ir modificando *N_Redundancy* en ésta sin modificarlo para la técnica de la Frecuencia) y *W_Redundancy* en 0.2 s para la técnica del Auto anuncio; Por otro lado, para generar el escenario de dos técnicas al 50% se han elegido la técnica de la Distancia y la Frecuencia fijándole a la primera de ellas las variables de *R_Redundancy* en 150 metros y *W_Redundancy* en 0.2 segundos, ya que con ellas se obtenían unos buenos balances entre CBR y percepción. Además, se ha elegido la técnica de la Frecuencia fijando la variable de *N_Redundancy* en 2 y se irá variando *WF_Redundancy* (nueva variable que se le ha dado a la técnica de la frecuencia para poder ir modificando *W_Redundancy* en ésta sin modificarlo para la técnica de la Distancia) en tres valores, 0.1, 0.2, 0.3 segundos, ya que el CBR y la percepción varían de forma significativa cuando se modifica ésta. En el segundo se ha impuesto que *R_Redundancy* tenga el valor de 150 m y *W_Redundancy* 0.2 s para la técnica de la Distancia; *N_Redundancy* en 2 y *WF_Redundancy* en 0.1, 0.2, 0.3 s para la técnica de la Frecuencia;

5.4.1. ESCENARIO MIXTO CON CUATRO TÉCNICAS AL 25%

A continuación, vamos a analizar los resultados obtenidos de forma más general para el escenario mixto con parámetros intermedios de las cuatro técnicas anteriormente explicadas, haciendo especial hincapié en las simulaciones que realmente lo merezcan, ya que al haber tantas variables actuando sobre el escenario simultáneamente es complicado analizarlo de forma individual y no hacerlo de forma más generalista. En esta simulación, cada 25% de los vehículos del escenario llevará a cabo una de las anteriores técnicas para mitigar la redundancia de objetos de los CPMs.

En la figura 71 se presenta la PDF del número de objetos que se incluyen en cada CPM para las dos densidades de tráfico analizadas. También se contempla como para la técnica del 25%, el escenario de baja densidad incluye un objeto en cada CPM el 25% del tiempo y tiene un porcentaje cercano al 0% a la hora de incluir 10 objetos en un CPM, mientras que ETSI introduce entre 2.5 y 8 objetos la mayoría del tiempo. La curva roja es parecida a las obtenidas en las técnicas de la Dinámica y la Distancia. Por otro lado, para el escenario de alta densidad las dos curvas se comportan de manera similar en el rango de 0 a 5 objetos pero la técnica del 25% posee un mayor porcentaje en este rango, ya que la probabilidad es nula a partir de los 7.5 objetos y para ETSI no. La curva roja es similar a obtenida en la técnica de la Distancia.

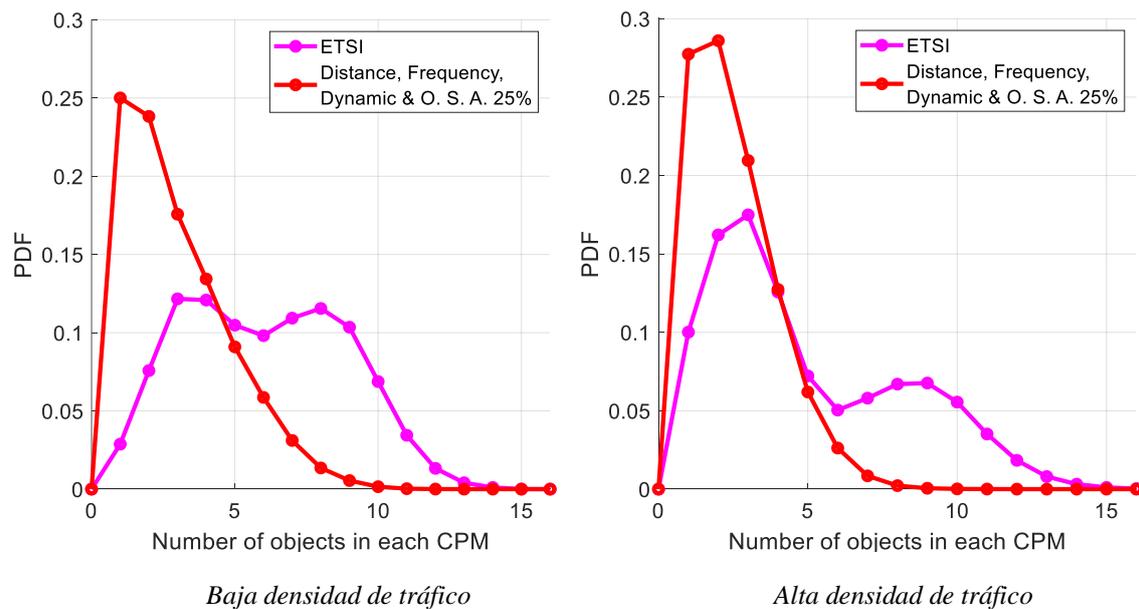


Figura 71. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM con cuatro técnicas simultáneas al 25% de vehículos cada una

En la figura 72 se presenta la PDF del número de CPMs generados por segundo en dos escenarios diferentes. En ambos escenarios se puede contemplar como la técnica del 25% descende la probabilidad sobre un 40% de generar 10 CPMs por segundo y por ello aumentando las probabilidades de valores inferiores. Cabe destacar que la curva del escenario de baja densidad se comporta de forma similar al de la técnica de la Frecuencia, mientras que el de alta densidad se parece al de la técnica del Auto anuncio.

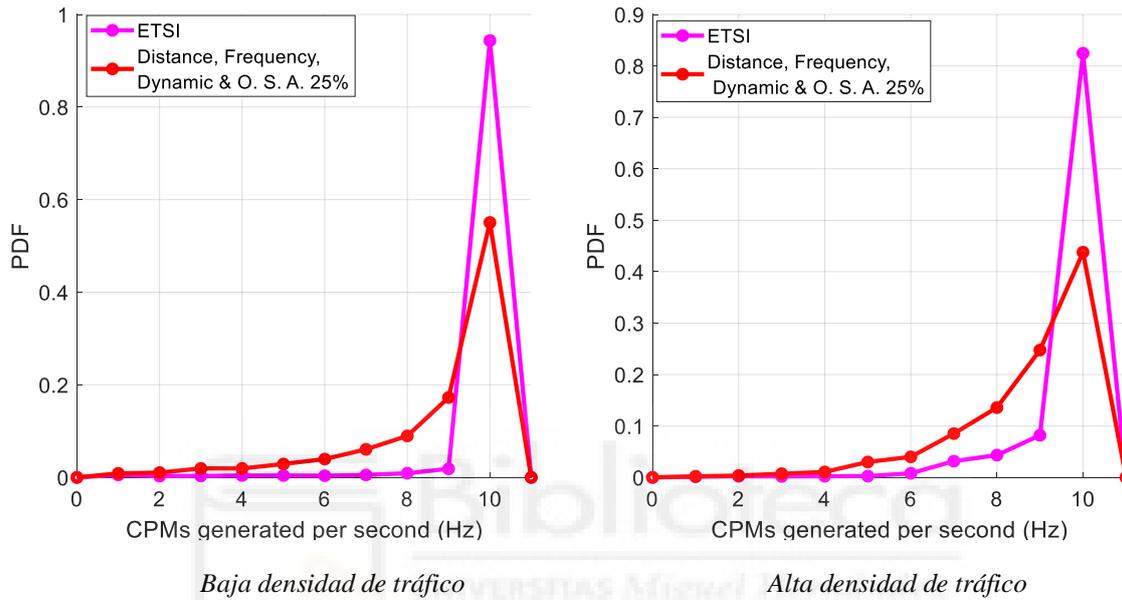


Figura 72. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo con cuatro técnicas simultáneas al 25% de vehículos cada una

En la Tabla 11, podemos observar el ratio de ocupación del canal para la técnica combinada en tanto por ciento en comparación con cada una de las técnicas, el cual es similar a la media de las 4 técnicas para baja (20.48%) y alta (34%). Este resultado mejora considerablemente a la técnica de ETSI (27.48% baja densidad y 45.16 % alta densidad) y se asemeja a la técnica de la Dinámica vehicular en el escenario de baja densidad y a la técnica de la Distancia en el escenario de alta densidad.

Densidad de Tráfico	CBR (%)				
	Diná. Ve. (P1m, S0.5 m/s)	Distancia (R100m, W0.2s)	Frecuencia (N4, W0.2s)	Auto anuncio (N1, W0.1s)	Escenario mixto
Baja	20.50	22.41	20.58	18.43	20.37
Alta	31.71	35.56	34.15	34.43	35.47

Tabla 11. Ratio de ocupación del canal para las 4 técnicas combinadas al 25% cada una comparado con técnicas (CBR)

En la figura 73 se presenta el PDR experimentado en función de la distancia entre receptor y transmisor para dos densidades diferentes, en ellas vemos el porcentaje de paquetes entregados satisfactoriamente en cada uno de los escenarios, el cual es mejor para la técnica del 25% respecto a ETSI al haber una menor interferencia entre mensajes. La curva roja se comporta de manera similar a la de la técnica de la frecuencia siendo un poco superior a los 300 metros de distancia.

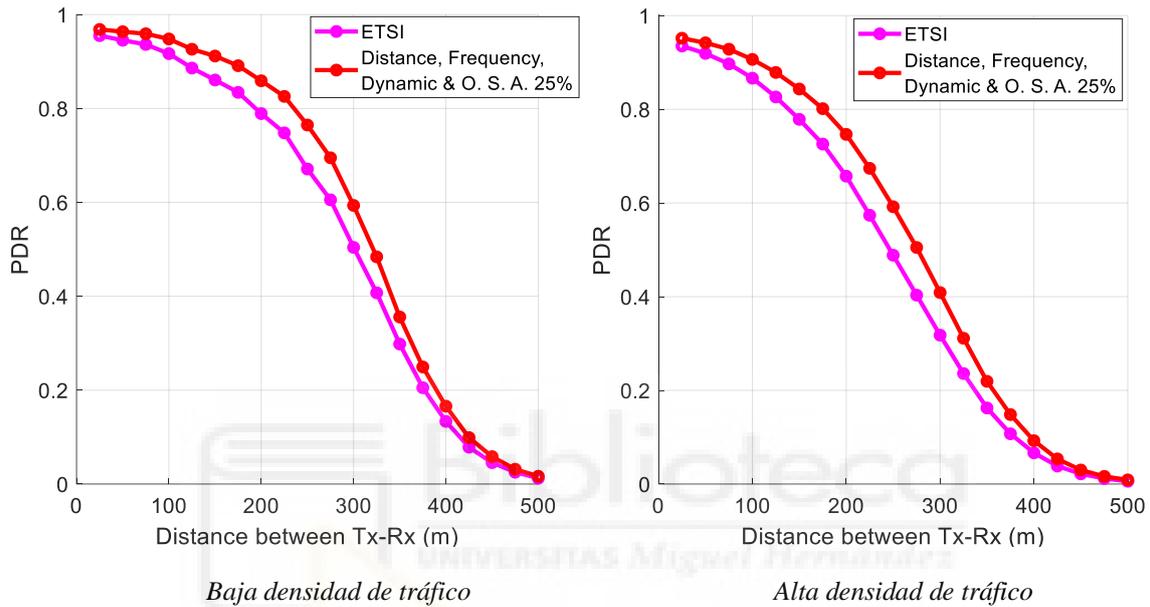


Figura 73. Ratio de entrega de paquetes con cuatro técnicas simultáneas al 25% de vehículos cada una (PDR)

En la figura 74 se presenta la redundancia experimentada en función de la distancia entre el receptor de los CPMs y cada objeto. En ella se pueden contemplar dos gráficas en las que vemos la redundancia de objetos detectados para cada uno de los escenarios. Haciendo uso de las gráficas anteriores para la redundancia del objeto de cada técnica, podemos comprobar que la media de éstas es muy similar a la obtenida en las gráficas de la figura 74.

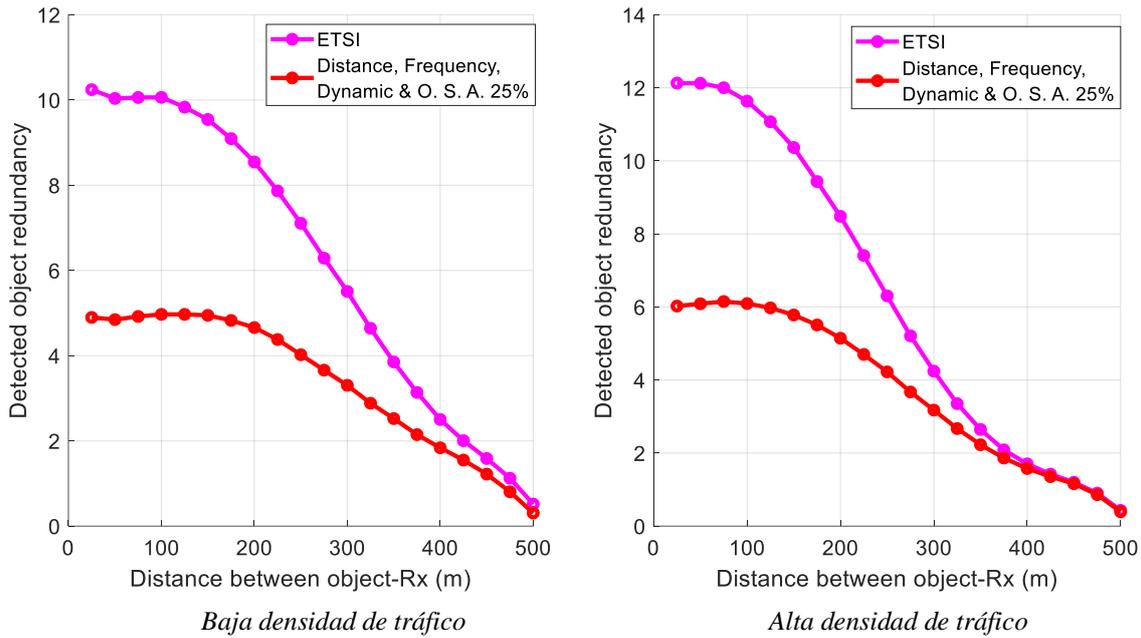


Figura 74. Redundancia del objeto detectado con cuatro técnicas simultáneas al 25% de vehículos cada una

En la figura 75 se presenta la percepción del objeto experimentada en función de la distancia entre el receptor y el objeto. En ella se pueden contemplar como para el escenario de baja densidad la curva del escenario mixto es similar a la de la técnica de la Dinámica, mientras que para el escenario de alta densidad es idéntica a la de la técnica de la Frecuencia. Los resultados demuestran para alta densidad de tráfico como al simular el escenario con varias técnicas la curva se comporta como la que mejor percepción obtenía, en este caso, la de la Frecuencia. Por lo anteriormente nombrado, cabe destacar que al efectuar una simulación combinando las cuatro técnicas parece que mejoremos un poco la media de la percepción, ya que se complementan las unas a las otras. **Es muy importante destacar** como para la curva del escenario mixto con las cuatro técnicas al 25% de alta densidad obtenemos la misma percepción que para la técnica de la frecuencia, pero ésta era un punto mayor (7 objetos, Figura 52) en redundancia del objeto para la curva de $N_Redundancy = 4$, con lo que se podía deducir que es muy satisfactorio simular un escenario mixto con vehículos simulando diferentes técnicas.

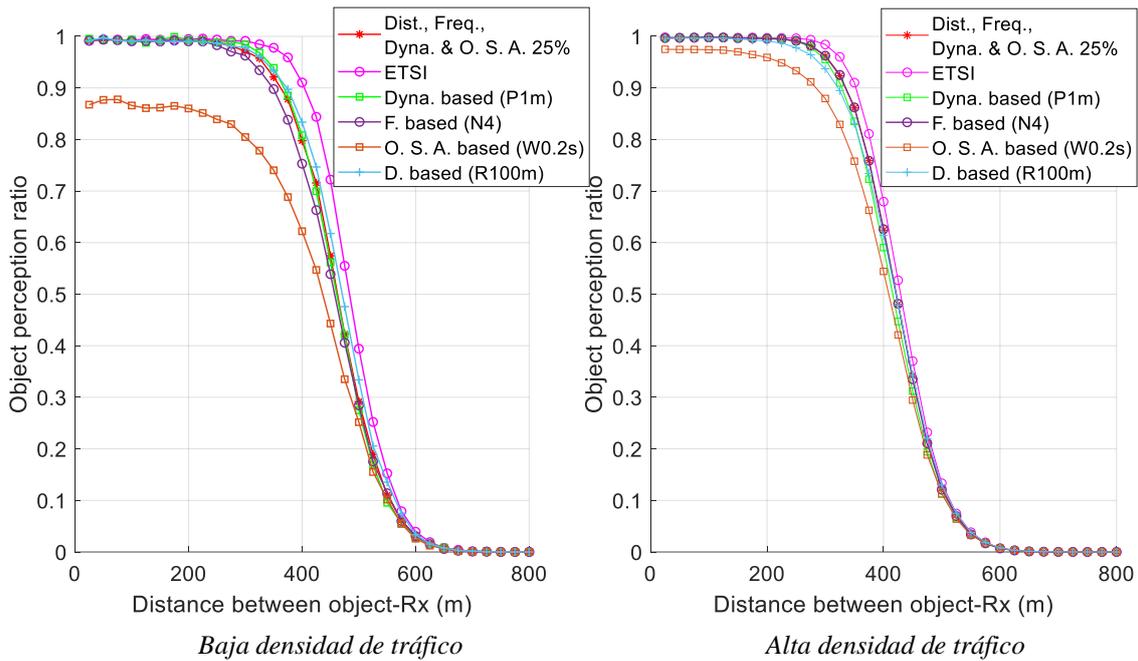


Figura 75. Ratio de percepción de objetos con cuatro técnicas simultáneas al 25% de vehículos cada una

5.4.2. ESCENARIO MIXTO CON DOS TÉCNICAS AL 50%

A continuación, vamos a analizar los resultados obtenidos para el escenario mixto con dos técnicas al 50%, estas son la técnica de la distancia y la de la frecuencia, esto consistirá en explicar cada conjunto de gráficas por separado y detallar por qué cambian su comportamiento al modificar la variable de $WF_Redundancy$.

En este escenario podemos observar como la técnica evaluará varios parámetros para llevar a cabo una menor o mayor inserción, nos referimos a que habrá que tener en cuenta $R_Redundancy$, $W_Redundancy$, $N_Redundancy$, las cuales mantendremos fijadas en un mismo valor e iremos modificando $WF_Redundancy$ para ver como varían las simulaciones en los dos escenarios, además también hay que tener en cuenta la densidad de tráfico.

En la figura 76 se presenta el PDR experimentado en función de la distancia entre receptor y transmisor se puede contemplar como al aumentar el umbral $WF_Redundancy$ disminuye el número de objetos en cada CPM, esto es debido a que al aumentar la longitud de ventana se analizarán un mayor número de objetos siendo así más fácil cumplir la condición del umbral $N_Redundancy$. Por otro lado, vemos que las curvas con $WF2$ y $WF3$ son prácticamente idénticas, esto ocurre porque los transmisores antes de

enviar información compararán sus objetos con su historial de CPMs recibidos, el cual estará compuesto aproximadamente de los mismos objetos con un $WF_Redundancy$ de 0.2 o 0.3 s. Esto hará que se eliminen más objetos al poder comparar con un mayor número de CPMs recibidos anteriormente. Esta situación también se verá reflejada más adelante en otras simulaciones. Cabe destacar que el escenario mixto mejora al de ETSI cuando se va modificando $WF_Redundancy$, ya que se obtienen porcentajes altos cuando el número de objetos en cada CPM es bajo y porcentajes bajos o casi nulos cuando es alto en ambos escenarios. Las curvas no presentan similitudes con ninguna de las dos técnicas.

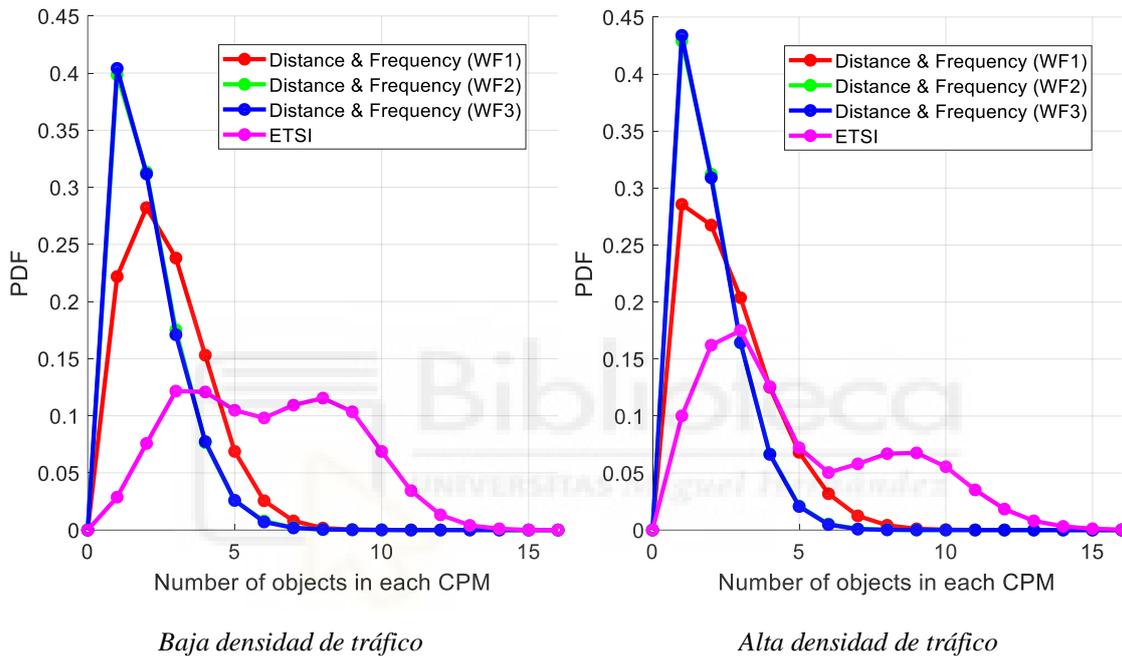


Figura 76. Función de densidad de probabilidad del número de objetos en cada CPM en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia, $R_Redundancy$ 150m, $W_Redundancy$ 0.2s y $N2$

En la figura 77 se presenta la PDF del número de CPMs generados por segundo en dos escenarios diferentes. En ella se aprecia como al incrementar la longitud de ventana se eliminarán más objetos de los CPMs debido a analizar un mayor número de objetos siendo así más fácil cumplir la condición del umbral $N_Redundancy$. De nuevo, vemos como las curvas con $WF2$ y $WF3$ son prácticamente idénticas. Cabe destacar que el escenario mixto mejora al de ETSI cuando se va modificando $WF_Redundancy$, ya que desciende el porcentaje de que se generen 10 CPMs por segundo considerablemente en ambos escenarios. Las curvas son similares a las de la técnica de la frecuencia, por ello, para $WF2$ y $WF3$ se obtienen unas curvas con un descenso pronunciado similar al que se obtiene en la técnica de la Frecuencia.

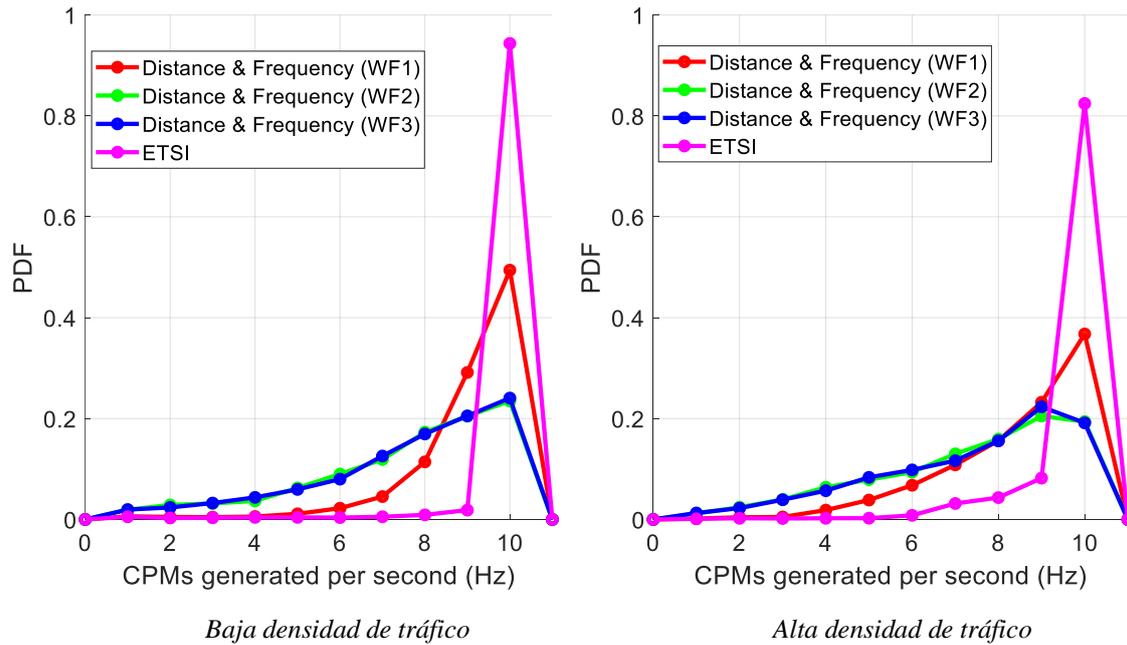


Figura 77. Función de densidad de probabilidad de CPMs generados por segundo en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia, $R_Redundancy$ 150m, $W_Redundancy$ 0.2s y N2

En la Tabla 12, podemos observar la CBR obtenida en el escenario. Los resultados muestran que la CBR desciende a medida que aumentamos la variable $WF_Redundancy$. Como veníamos viendo anteriormente para 0.2s y 0.3s es prácticamente igual, lo que sucede en gran parte porque ambas comparten prácticamente el mismo CBR y por ello afecta a todas las gráficas de la simulación. Para examinar más en detalle cómo se comporta esta técnica combinada, nos ayudaremos de las respectivas dos tablas anteriores del ratio de ocupación del canal de la técnica de la Distancia y la de la Frecuencia. En ellas, observamos como para baja densidad de tráfico y las tres “ $WF_Redundancy$ ” el CBR es muy próximo a la media entre ambas técnicas. Por otro lado, para alta densidad de tráfico el CBR de las dos técnicas combinadas varía algo más respecto a la media entre ambas. Cabe destacar que el escenario mixto mejora el CBR respecto a ETSI para las distintas $WF_Redundancy$, incluso superándolo en un 10% para el escenario de baja densidad y en algo menos de un 15% para el de alta cuando ésta tiene valores de 0.2 y 0.3 segundos. La curva de $WF_Redundancy$ 0.1 segundos en el escenario de baja densidad obtiene exactamente el mismo valor que la de la técnica de la frecuencia, en cambio, para las dos densidades y para 0.2 y 0.3 segundos no se encuentran similitudes.

Densidad de Tráfico	CBR (%)			
	WF_Redundancy 0.1 (s)	WF_Redundancy 0.2 (s)	WF_Redundancy 0.3 (s)	ETSI
Baja	20.59	17.06	17.02	27.48
Alta	35.27	30.32	30.31	45.16

Tabla 12. CBR en escenario mixto con 50% de vehículos empleando la técnica basada en distancia y el resto basada en frecuencia

En la figura 78 se presenta el PDR experimentado en función de la distancia entre receptor y transmisor, cabe destacar que al aumentar la longitud de ventana *WF_Redundancy* aumentará el PDR ya que como hemos visto se reduce la CBR y por lo tanto la interferencia. De nuevo observamos como la curva *WF2* y *WF3* son prácticamente idénticas, de hecho, están casi superpuestas la una sobre la otra. Cabe destacar que el escenario mixto mejora el PDR respecto a ETSI, siendo para *W_Redundancy* 0.2 y 0.3 segundos cuando mejores valores se obtiene. El resultado no presenta similitudes con las técnicas.

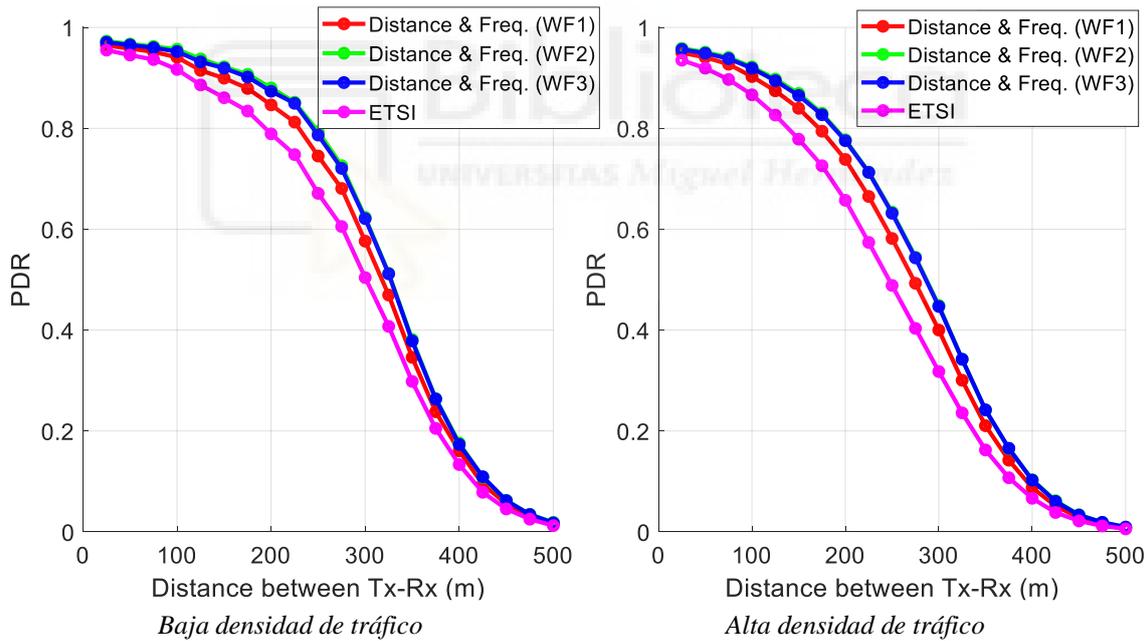


Figura 78. Ratio de entrega de paquetes en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia, *R_Redundancy* 150m, *W_Redundancy* 0.2s y *N2*

En la figura 79 se presenta la redundancia experimentada en función de la distancia entre el receptor de los CPMs y cada objeto. Cabe destacar que al aumentar el tamaño de ventana “*W_Redundancy*” como el CAV transmisor analizará un segmento mayor del historial de CPMs recibidos, podrá cumplir de manera más sencilla la condición de

mitigación del objeto. Por lo tanto, disminuirá la redundancia del objeto detectado como en la técnica basada en la frecuencia. Además, en la gráfica “b)” podemos observar que se detecta una mayor redundancia del objeto respecto a la gráfica “a)” al disponer de un mayor número de vehículos este escenario. Si observamos las dos figuras anteriores correspondientes a la redundancia de estas dos técnicas, podemos contemplar como la redundancia del objeto detectado en el escenario con baja densidad de tráfico es dominada por la técnica de la Frecuencia, la cual tiene una redundancia muy aproximada a la que podemos ver en la figura 75 “a)”. Por otro lado, para el escenario de alta densidad sucede algo parecido, ya que la redundancia está más en consonancia con la obtenida para la técnica de la Frecuencia.

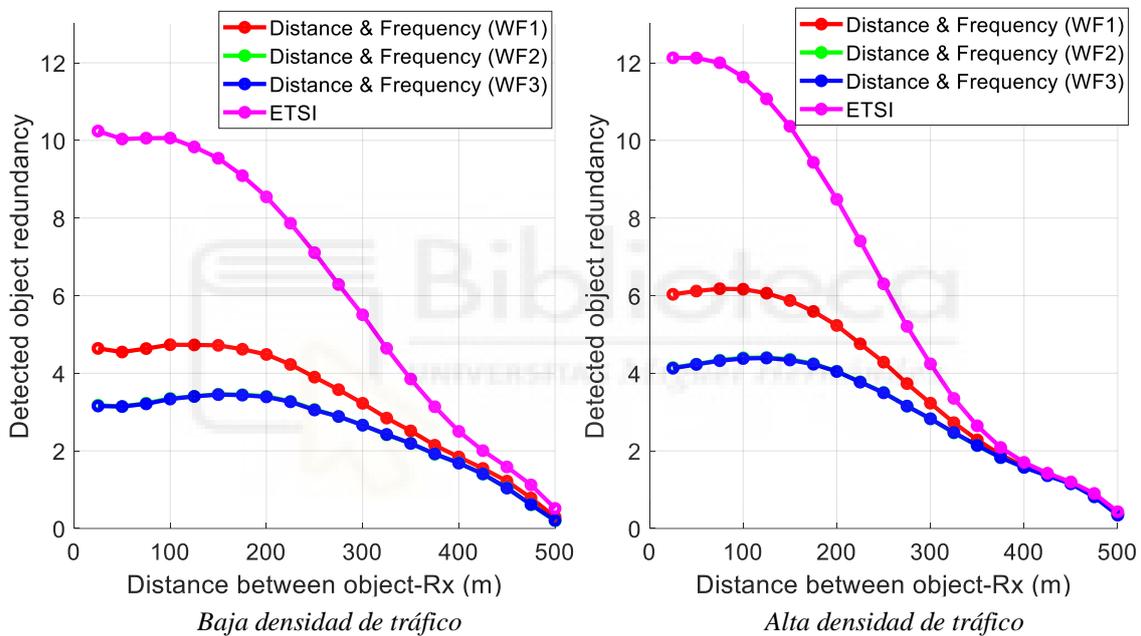


Figura 79. Redundancia del objeto detectado en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia, $R_Redundancy$ 150m, $W_Redundancy$ 0.2s y N2

En la figura 80 se presenta la percepción del objeto experimentada en función de la distancia entre el receptor y el objeto. En dicha figura se puede contemplar como al aumentar la longitud de ventana $WF_Redundancy$, disminuye la percepción, la cual va en consonancia con la redundancia del objeto.

Cabe destacar que para densidad baja, las curvas obtenidas con $WF_redundancy = 0.2s$ y $WF_redundancy = 0.3s$ se obtienen de aproximadamente una media entre las dos técnicas. En cambio, la curva azul es dominada por la técnica de la Distancia, lo cual interesa debido a que, para la técnica de la Frecuencia con estos parámetros de simulación obteníamos una peor percepción a los 300m. Por otro lado, para la “b)” la curva roja y la

verde vuelven a ser aproximadamente una media de ambas técnicas, en cambio, la curva azul mejora la percepción respecto a las dos técnicas por separado, de lo que se deduce que podría ser interesante crear un escenario mixto con dos técnicas para que se complementen entre ellas.

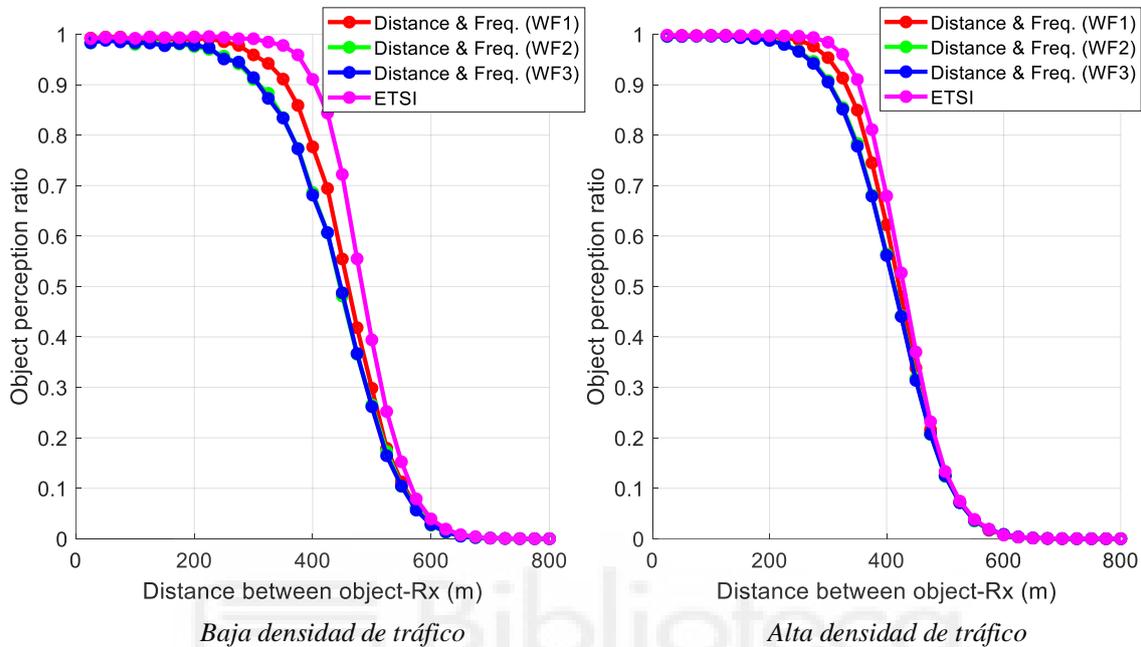


Figura 80. Ratio de percepción de objetos en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia, $R_{Redundancy}$ 150m, $W_{Redundancy}$ 0.2s y N2

Para finalizar este punto vamos a comparar en varias gráficas distintas la percepción y la redundancia del objeto obtenida para el escenario mixto que acabamos de evaluar en comparación con las dos técnicas que lo comprenden, como son la técnica de la Distancia y la de la Frecuencia.

En la figura 81, se presenta la percepción del objeto experimentada en función de la distancia entre el receptor y el objeto, en el escenario mixto respecto a los escenarios de la frecuencia y distancia. En ella cabe destacar que la curva roja del escenario mixto, es muy similar a la curva azul de la frecuencia para ambas densidades de tráfico, por lo que predomina la técnica de la frecuencia en este escenario. También podemos destacar que, para el escenario de baja densidad de tráfico, la curva roja del escenario mixto es ligeramente superior a la azul de la Frecuencia, en cambio, para el escenario de alta densidad pasa lo contrario. Por último, podemos destacar que al simular un escenario con vehículos usando diferentes técnicas mejoramos la que obtenía peores valores, en este caso la de la Distancia.

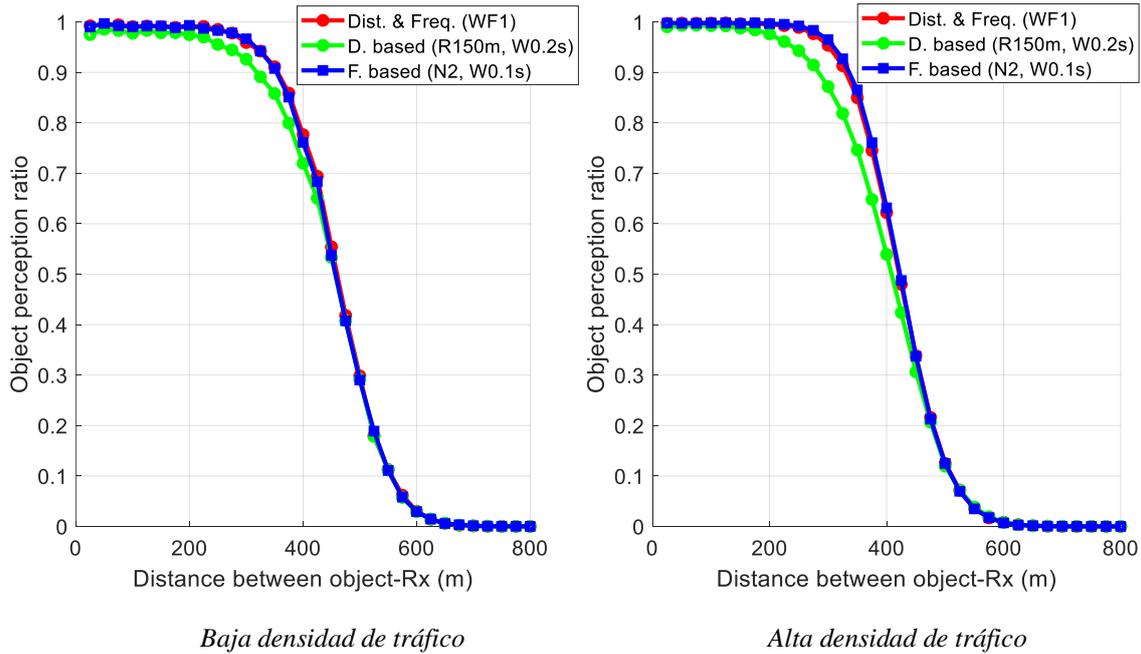


Figura 81. Ratio de percepción de objetos en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia con WF1 respecto a las técnicas de la Distancia y Frecuencia

En la figura 82, se presenta la percepción del objeto experimentada en función de la distancia entre el receptor y el objeto, en el escenario mixto respecto a los escenarios de la frecuencia y distancia. En ella cabe destacar que la curva roja del escenario mixto, es inferior a la curva verde de la distancia. También podemos destacar que, para el escenario de alta densidad de tráfico, la curva roja del escenario mixto es prácticamente idéntica a la azul de la Frecuencia. Por último, podemos destacar que al simular un escenario con vehículos usando diferentes técnicas mejoramos la que obtenía peores valores, en este caso la de la Frecuencia en baja densidad y la de la Distancia en alta densidad.

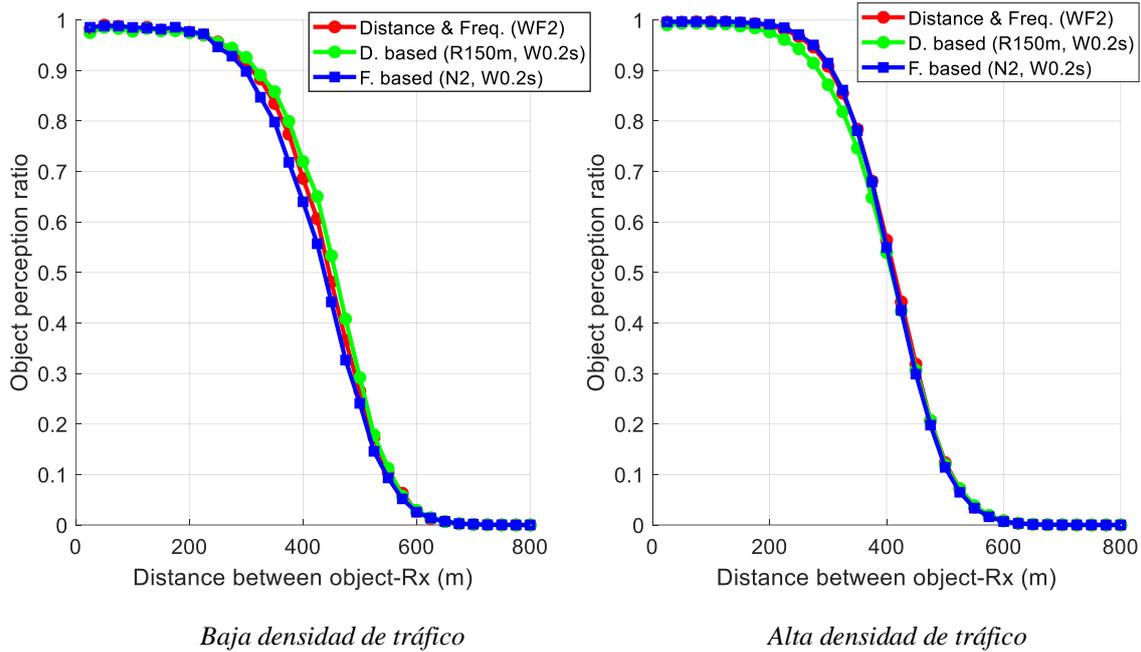


Figura 82. Ratio de percepción de objetos en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia con WF2 respecto a las técnicas de la Distancia y Frecuencia

En la figura 83, se presenta la percepción del objeto experimentada en función de la distancia entre el receptor y el objeto, en el escenario mixto respecto a los escenarios de la frecuencia y distancia. En ella cabe destacar que la curva roja del escenario mixto, es muy similar a la curva verde de la distancia, superándola esta última al ir aumentando la distancia entre receptor y objeto. También podemos destacar que, para el escenario de alta densidad de tráfico, la curva roja del escenario mixto es ligeramente superior a la azul de la Frecuencia y a la roja de la Distancia hasta unos 225 metros, lo que haría interesante el escenario mixto para alta densidad de tráfico. Por último, podemos destacar que al simular un escenario con vehículos usando diferentes técnicas mejoramos la que obtenía peores valores, en este caso la técnica de la Frecuencia.

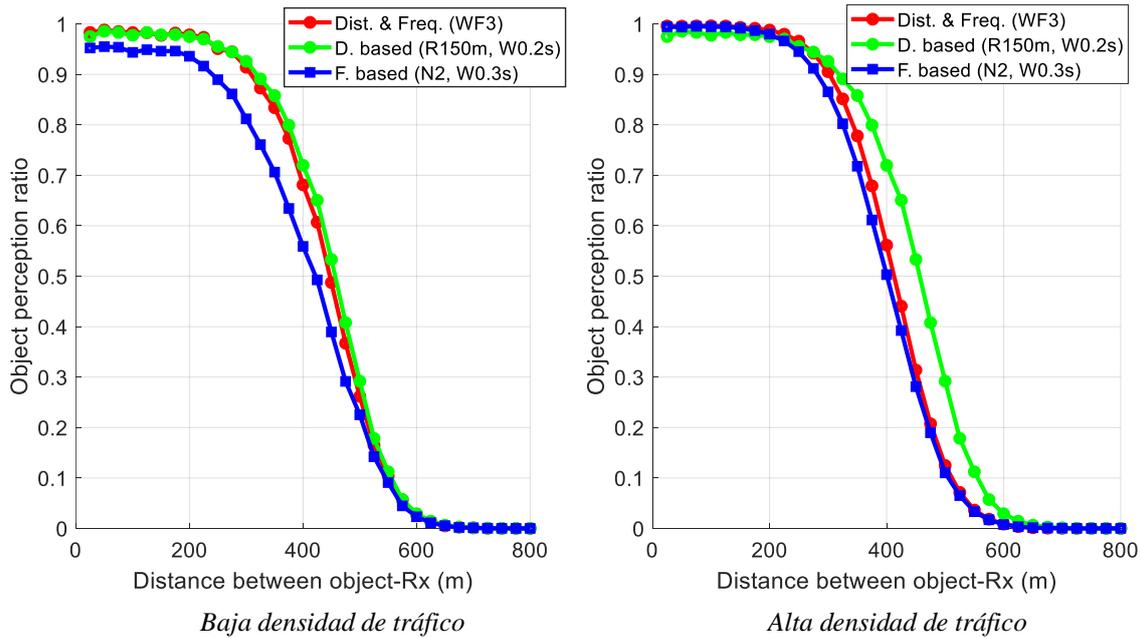


Figura 83. Ratio de percepción de objetos en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia con WF3 respecto a las técnicas de la Distancia y Frecuencia

En la figura 84, se presenta la redundancia del objeto detectado experimentada en función de la distancia entre el receptor y el objeto, en el escenario mixto respecto a los escenarios de la frecuencia y distancia. En ella cabe destacar que la curva roja del escenario mixto de baja densidad es muy similar a la curva azul de la frecuencia, casi idénticas, por lo que no sería necesario un escenario mixto en baja densidad. También podemos destacar que, para el escenario de alta densidad de tráfico, la curva roja del escenario mixto es inferior a la azul de la Frecuencia en aproximadamente un punto por debajo, lo cual resulta interesante si volvemos a observar la figura con *WFI* en la que se obtenía una percepción del objeto muy similar entre la técnica de la frecuencia y el escenario mixto. De lo anterior, deducimos que podría ser interesante elegir el escenario mixto para alta densidad de tráfico para descender la redundancia del objeto en un punto, a cambio de no perder prácticamente percepción.

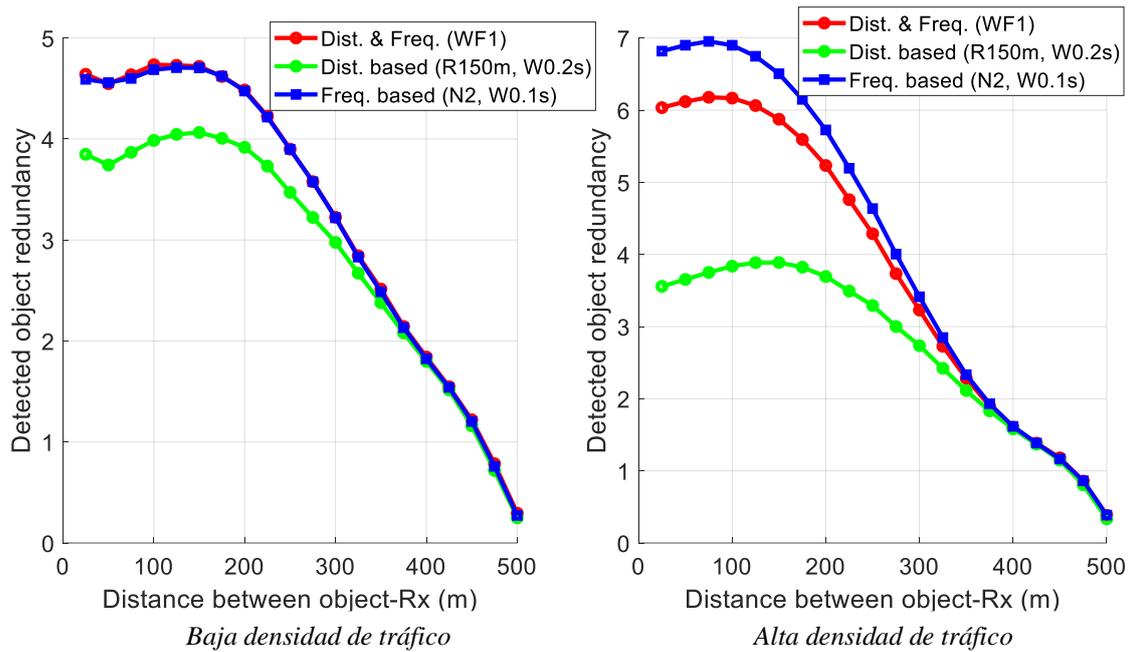


Figura 84. Redundancia del objeto detectado en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia con WF1 respecto a las técnicas de la Distancia y Frecuencia

En la figura 85 cabe destacar que la curva roja del escenario mixto de baja densidad queda entre las curvas de la técnica de la Distancia y Frecuencia, y, la percepción obtenida anteriormente en la figura WF2 era similar para el escenario mixto y la técnica de la Distancia. También podemos destacar que, para el escenario de alta densidad de tráfico, la curva roja del escenario mixto es muy similar a la azul de la Frecuencia como también se observaba en la figura con WF2, lo que nos hace pensar que podríamos simular el escenario de alta densidad con la técnica de la Frecuencia y sin necesidad de crear un escenario mixto.

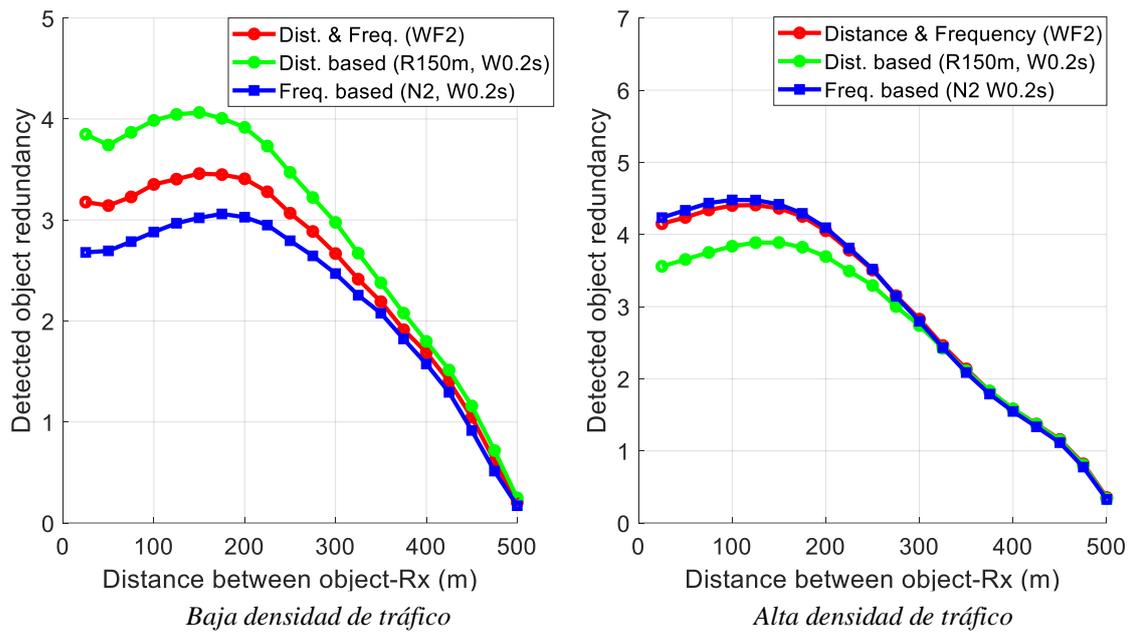


Figura 85. Redundancia del objeto detectado en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia con WF2 respecto a las técnicas de la Distancia y Frecuencia

En la figura 86, cabe destacar que la curva roja del escenario mixto de baja densidad es inferior a la curva verde de la Distancia, lo que hace una opción interesante al escenario mixto en baja densidad de tráfico, ya que en la figura de WF3 se obtenía una percepción similar entre escenario mixto y el de la Distancia. También podemos destacar que, para el escenario de alta densidad de tráfico, la curva roja del escenario mixto es superior a la de ambas técnicas, por lo que si observamos la figura de WF3 la hace una opción descartable, ya que a cortas distancia sería más interesante la técnica de la Frecuencia debido a su percepción y su redundancia, y, sería recomendable usar la técnica de la Distancia debido a su mayor percepción a largas distancias.

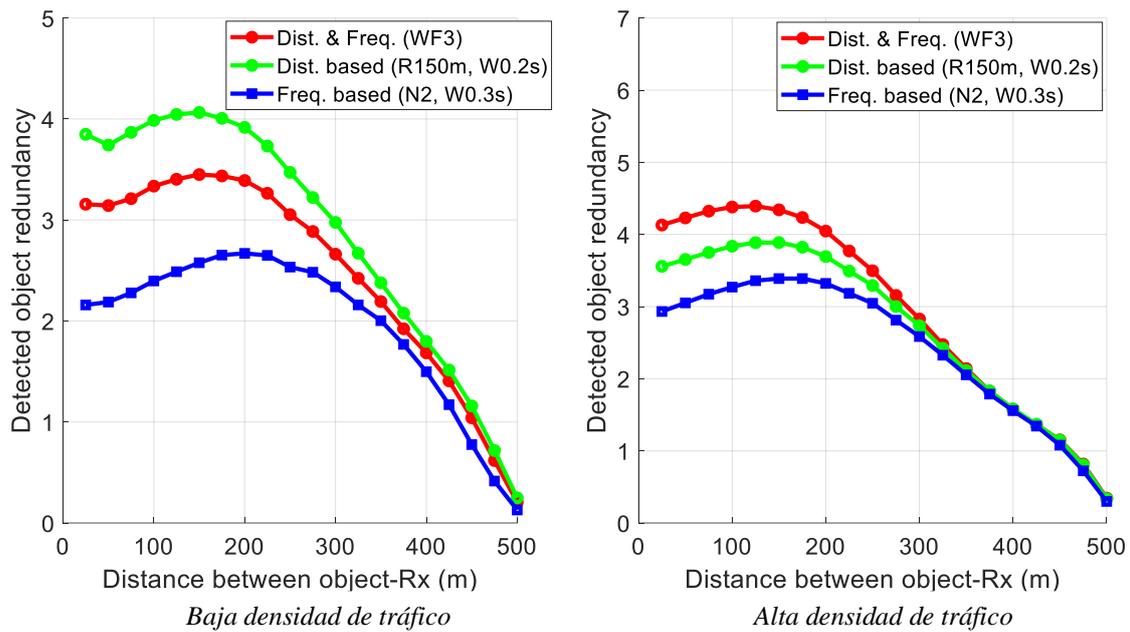


Figura 86. Redundancia del objeto detectado en escenario mixto con 50% de vehículos usando la técnica de la distancia y el resto la de la frecuencia con WF3 respecto a las técnicas de la Distancia y Frecuencia

5.4.3. DISCUSIÓN

En este punto, se pretende valorar el efecto de emplear varias técnicas en un mismo escenario o si convendría que todos los vehículos emplearan la misma. Por el momento, no se especifica en el proceso de estandarización que se vaya a decidir por una única técnica o combinaciones de éstas, así que este estudio puede ser relevante para tomar una decisión en el futuro.

Sobre los puntos anteriores, hemos observado que es conveniente analizar cada escenario según su densidad de tráfico de forma individual, ya que para diferentes densidades podría interesar una técnica en concreto o un escenario mixto de éstas. En los resultados obtenidos se podía observar como en un escenario mixto con las cuatro técnicas al 25% de alta densidad obteníamos prácticamente la misma percepción que para la técnica de la frecuencia, pero ésta era 1 punto mayor en redundancia del objeto, con lo que se podía deducir que era muy satisfactorio simular un escenario mixto con vehículos simulando diferentes técnicas.

Los resultados también reflejaban como en un escenario mixto de alta densidad al 50% para la técnica de la Frecuencia y Distancia se reducía en 1 punto aproximadamente la

redundancia del objeto respecto a un escenario con una única técnica a cambio de no disminuir prácticamente la percepción del objeto.



6. CONCLUSIONES

En este documento hemos descrito, implementado y analizado mecanismos que tratan de controlar y reducir la redundancia en percepción cooperativa. Se ha utilizado como base inicial los mecanismos propuestos en el proceso de estandarización de ETSI, y, se ha estudiado como podrían funcionar en escenarios mixtos. Se ha discutido cuales de estos mecanismos obtenían mejores valores en cuestión de percepción y redundancia del objeto detectado o CBR. Para compararlos se ha estudiado para dos escenarios diferentes, uno de baja densidad de tráfico y otro de alta, diferentes métricas como son: la PDF del número de objetos que se incluyen en cada CPM; la PDF del número de CPMs que genera cada vehículo por segundo; el nivel de CBR que es una métrica utilizada para cuantificar la carga del canal; la PDR o tasa de paquetes correctamente recibidos en función de la distancia entre transmisor y receptor; el ratio de percepción de objetos detectados con CPMs en función de la distancia entre el objeto y el vehículo que recibe los CPMs; la redundancia experimentada en función de la distancia entre el receptor de los CPMs y el objeto. Mediante este estudio de los resultados hemos podido comprobar que la implementación de mecanismos para el control de la redundancia disminuye considerablemente la carga del canal radio, suponiendo en general una mejora de las comunicaciones V2X, tanto en escenarios de baja densidad de tráfico como de alta. Sin embargo, reduce la percepción del objeto en alguno de los mecanismos y para algunos parámetros de forma considerable, lo que comprometería la seguridad de la vía si utilizáramos ese mecanismo con esos parámetros. Por ello, se debe elegir uno de estos mecanismos teniendo en cuenta la percepción del objeto detectado y la redundancia de este, es decir, llegando a “un acuerdo” entre ambas partes.

Del estudio de los resultados obtenidos para un escenario que simula una sola técnica se podía concluir como en términos de CBR y de percepción del objeto el mejor mecanismo era el que se basa en la Dinámica vehicular tanto para escenarios con baja densidad de tráfico como de alta.

Por otra parte, estudiando los resultados de los escenarios mixtos se podía observar como en un escenario con cuatro técnicas al 25% de alta densidad obteníamos prácticamente la misma percepción que para la técnica de la frecuencia que en este caso era la mejor, pero siendo ésta 1 punto mayor en redundancia del objeto, con lo que se podía deducir que era muy satisfactorio simular un escenario mixto con vehículos simulando diferentes

técnicas. Además, el estudio de los resultados también reflejaba como en un escenario mixto de alta densidad al 50% para la técnica de la Frecuencia y Distancia se reducía también en 1 punto aproximadamente la redundancia del objeto respecto a un escenario con una única técnica a costa de no disminuir prácticamente la percepción del objeto.

Los resultados obtenidos en este Trabajo de Fin de Grado abren varias líneas de investigación futuras. En primer lugar, sería conveniente implementar los mecanismos restantes del proceso de estandarización de ETSI para analizar conjuntamente esos mecanismos con los del presente documento y observar si mejoran a éstos. En segundo lugar, se podrían estudiar más escenarios mixtos con los mecanismos ya implementados en este documento o con los de futuras implementaciones. Por último y para concluir, se podría estudiar la combinación de varias técnicas en un mismo escenario, ya sea con las presentes en este documento o las implementadas en futuros estudios.



7. BIBLIOGRAFÍA

1. E. Yurtsever, J. Lambert, A. Carballo and K. Takeda, "A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies," IEEE Access (8), marzo 2020.
2. K. Jo, J. Kim, D. Kim, C. Jang, and M. Sunwoo, "Development of autonomous Car—Part I: Distributed system architecture and development process," IEEE Transactions on Industrial Electronics (61), diciembre 2014.
3. F. Rosique, P. J. Navarro, C. Fernández, and A. Padilla, "A systematic review of perception system and simulators for autonomous vehicles research," Sensors 19 (3), febrero 2019.
4. J. Van Brummelen, M. O'Brien, D. Gruyer, and H. Najjaran, "Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow," Transp. Res. C, Emerg. Technol. 89, abril 2018.
5. E. Marti, M. A. de Miguel, F. Garcia and J. Perez, "A Review of Sensor Technologies for Perception in Automated Driving," IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine 11, 2019.
6. SAE, "Cooperative Perception System", J2945/8, 2018.
7. ETSI CAV, "Intelligent Transport System (CAV); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective Perception Service (CPS)", ETSI TR 103 562 V2.1.1, Francia, diciembre 2019.
8. ETSI CAV, "Intelligent Transport System (CAV); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Specification of the Collective Perception Service", ETSI TS 103 324 V0.0.20 (draft), febrero 2021.

9. K. Garlich, H. J. Günther and L. Wolf, "Generation Rules for the Collective Perception Service", Proc. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Los Angeles, CA, USA, 2019.
10. G. Thandavarayan, M. Sepulcre and J. Gozalvez, "Generation of Cooperative Perception Messages for Connected and Automated Vehicles", IEEE Transactions on Vehicular Technology 69 (12), noviembre 2020.
11. G. Thandavarayan, M. Sepulcre and J. Gozalvez, "Redundancy Mitigation in Cooperative Perception for Connected and Automated Vehicles," IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), Antwerp, Belgium (virtual), mayo 2020.
12. R. Fukatsu and K. Sakaguchi, "Automated Driving with Cooperative Perception Using Millimeter-Wave V2V Communications for Safe Overtaking", Sensors, (21) abril 2021.
13. H. J. Günther, B. Mennenga, O. Trauer, R. Riebl, L. Wolf, "Realizing collective perception in a vehicle", Proc. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Columbus, Ohio, USA, 2016.
14. C. Allig and G. Wanielik, "Dynamic Dissemination Method for Collective Perception", Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (CAVC), Auckland, New Zealand, 2019.
15. H. J. Günther, R. Riebl, L. Wolf, C. Facchi, "Collective perception and decentralized congestion control in vehicular ad-hoc networks", Proc. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Columbus, Ohio, USA, 2016.
16. ETSI CAV, "Intelligent Transport Systems; Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, Standard", ETSI EN 302 637-2 V1.4.1, January 2019.

17. T. Higuchi, M. Giordani, A. Zanella, M. Zorzi, O. Altintas, "Value-Anticipating V2V Communications for Cooperative Perception", Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Paris, France, junio 2019.
18. K. Furukawa et al., "Controlling Sensor Data Dissemination Method for Collective Perception in VANET", Proc. IEEE PerCom Workshops, Kyoto, Japan, 2019, pp. 753-758.
19. F. A. Schiegg, D. Bischoff, J. R. Krost and I. Llatser, "Analytical Performance Evaluation of the Collective Perception Service in IEEE 802.11p Networks," IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Seoul, Korea (South), mayo 2020.
20. F. A. Schiegg, N. Brahmi and I. Llatser, "Analytical Performance Evaluation of the Collective Perception Service in C-V2X Mode 4 Networks," Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (CAVC), Auckland, New Zealand, 2019, pp. 181-188, 27-30.
21. F. A. Schiegg, I. Llatser, D. Bischoff, G. Volk, "Collective Perception: A Safety Perspective" Sensors, 2021.
22. G. Thandavarayan, M. Sepulcre, J. Gozalvez., "Analysis of Message Generation Rules for Collective Perception in Connected and Automated Driving", Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV), Paris (France), junio 2019.
23. Q. Delooz and A. Festag, "Network Load Adaptation for Collective Perception in V2X Communications", Proc. IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), Graz, Austria, noviembre 2019.
24. Web oficial de ns-3: <https://www.nsnam.org/about/what-is-ns-3/> [Acceso: 26 de julio de 2021].
25. Web de ns-3 simulator: <https://ns3simulator.com/> [Acceso: 26 de julio de 2021].

26. IEEE 802.11p: Hacia un estándar internacional para el acceso inalámbrico en entornos vehiculares: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4526014> [Acceso: 26 de julio de 2021].

27. NodeCon.: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.30/tutorial/singlehtml/index.html> [Acceso: 26 de julio de 2021].

28. YansWifiPhyHelper:
https://www.nsnam.org/doxygen/classns3_1_1_yans_wifi_phy_helper.html
[Acceso: 26 de julio de 2021].

29. NqosWaveMacHelper:
https://www.nsnam.org/doxygen/classns3_1_1_nqos_wave_mac_helper.html
[Acceso: 26 de julio de 2021].

30. Wifi80211pHelper:
https://www.nsnam.org/doxygen/classns3_1_1_wifi80211p_helper.html
[Acceso: 26 de julio de 2021].

31. NetDeviceContainer:
https://www.nsnam.org/doxygen/classns3_1_1_net_device_container.html
[Acceso: 26 de julio de 2021].

32. Ns2MobilityHelper:
https://www.nsnam.org/doxygen/classns3_1_1_ns2_mobility_helper.html
[Acceso: 26 de julio de 2021].

33. WifiPhy: https://www.nsnam.org/doxygen/classns3_1_1_wifi_phy.html
[Acceso: 26 de julio de 2021].