



Octava Edición

2019 - 2020

Trabajo completo

Nuevo modelo de peaje urbano. Aplicación a Barcelona

Autor:

Juan Pedro Hormigo Ventura

ACISA SA

Un nuevo modelo de peaje urbano. Aplicación a Barcelona

Antecedentes

El presente documento deriva de una investigación, dentro del campo de los peajes urbanos, concluida con la redacción de una tesis doctoral titulada “Nuevo modelo de peaje urbano vinculado a una segregación del tráfico por niveles de calidad”.

Resumen

Los peajes urbanos constituyen hoy en día uno de los instrumentos más esperanzadores para regular la entrada de vehículos en las ciudades, dada la flexibilidad y versatilidad que les otorga la tecnología disponible. Aunque inicialmente pueden sufrir un elevado grado de rechazo social, se ha demostrado, en ciudades como Singapur, Londres o Estocolmo, que estos esquemas terminan siendo aceptados porque reducen la circulación de automóviles y, con ello, los problemas de congestión y deterioro ambiental de sus centros urbanos. Si bien el argumento básico para su implementación es que los automovilistas paguen por las externalidades que generan, el modelo aplicado tiene efectos económicos y sociales que deben sopesarse.

Los actuales esquemas tarifarios de peaje urbano suelen ser de tipo cordón o de área. En ambos esquemas los usuarios pagan una tarifa por entrar en una determinada zona de la ciudad, sin que existan alternativas gratuitas. Estos esquemas no se ajustan al uso real que los vehículos hacen de la infraestructura urbana y son esencialmente injustos beneficiando a los que más congestionan. En el presente documento, se sugiere un nuevo modelo de peaje urbano para Barcelona. Los automovilistas que usen la red básica de transporte dentro de la ciudad podrán conducir más rápidos que aquellos que usen la red secundaria para desplazarse. Los primeros, sin embargo, pagarán una tarifa relacionada con la distancia recorrida y, posiblemente, con las externalidades generadas. Para calcularla se combinará la información sobre el vehículo con la del viaje, ésta obtenida a partir de la tecnología de navegación satelital y de las comunicaciones móviles. El esquema propuesto es socioeconómicamente más eficiente que los modelos de peaje urbano existentes y permitiría reducir más que ellos la congestión y la contaminación en la ciudad. Por otra parte, el peaje urbano genera importantes ingresos netos que pueden utilizarse para mejorar la movilidad sostenible y el espacio público. El caso de estudio muestra la viabilidad de este peaje urbano dinámico cuando hay una red viaria urbana bien estructurada.

1. Introducción

Los vehículos de motor, especialmente los de motor de combustión, tienen un gran impacto en la calidad ambiental de nuestras ciudades (Bull, 2003). Entre las posibles medidas que se pueden implementar para desincentivar la demanda del vehículo privado en los entornos urbanos y fomentar una movilidad medioambientalmente más sostenible, el “peaje urbano” se ha mostrado entre las más efectivas (Kopp & Prud’homme, 2008). Los estudios desarrollados en las pocas ciudades del mundo que han puesto en marcha esta medida – Singapur (Goh, 2002), Londres (Leape, 2006), Estocolmo (Prud’homme & Kopp,

2006), Milán (Rotaris, Danielis, Marcucci, & Massiani, 2010), Goteburgo (Börjesson & Kristoffersson, 2015),... - ponen de manifiesto que la exigencia de una contraprestación económica en forma de tasa diaria o similar para poder acceder con el vehículo privado a zonas urbanas congestionadas, delimitadas por un cordón, reduce de forma eficaz su uso y mejora la calidad ambiental de estas zonas (Crocì, 2016). Esto genera ciertas ventajas, como la reducción del tiempo de viaje para los usuarios que están dispuestos a pagar por acceder al área regulada (Santos, 2004). Este sistema de peaje de tipo "viñeta", en todo caso, no obedece a los principios de "quien usa paga" y "quien contamina paga" prescritos por la Unión Europea (Comisión Europea, 2001). Por otra parte, desde el punto de vista político, su aplicación es una acción muy atrevida que puede ser motivo de rechazo social (Börjesson, Eliasson, & Hamilton, 2016), sobre todo si hay una cierta percepción de que la medida tiene un ánimo recaudatorio más que ambiental. No obstante, la inevitable oposición al sistema de pago puede reducirse si los ingresos generados se utilizan para mejorar la sostenibilidad financiera del sistema de transporte público urbano (Börjesson, Eliasson, Hugosson, & Brundell-Freij, 2012) o para otras acciones de interés colectivo.

Este documento pretende plantear una discusión sobre cómo deberían diseñarse los futuros peajes urbanos para que fueran más justos y eficientes desde un punto de vista económico. La ciudad de Singapur ya trabaja en una evolución de su sistema actual de peaje urbano que permitirá tarificar a sus usuarios por la distancia real recorrida, aunque se desconoce todavía cuándo se aplicará (Zabic, 2011). Aquí se propone, con la ayuda de la tecnología, aplicar en la ciudad de Barcelona un tipo de peaje urbano más eficiente y justo que los actuales. La propuesta no solo implica la aplicación de un esquema tarifario urbano, sino que afecta a la estructura de la propia red viaria urbana, que se jerarquiza convenientemente para facilitar un servicio diferencial entre una red principal de pago y otra gratuita. Los usuarios de la red "rápida" pagarían en función de la distancia real recorrida.

2. Objetivos

Barcelona, que ha sido amenazada con sanciones por la Comisión Europea por sobrepasar los niveles de contaminación atmosférica regulados, ha anunciado medidas enfocadas a reducir la movilidad en transporte privado. Un ejemplo es la prohibición de circulación de los vehículos más antiguos de 20 años y la implantación, a partir del 2020, de la zona de bajas emisiones (ZBE). La ZBE impondrá multas a los vehículos más contaminantes que circulen por la zona restringida. Sin embargo, a pesar de la utilización creciente de los peajes urbanos y de restricciones de circulación, actualmente no existe una base extensa de estudios que analicen el posible impacto de estas medidas dentro del entorno de Barcelona. Este trabajo tiene como objetivo estudiar los efectos que tendría la implantación de un nuevo modelo de peaje urbano en la ciudad. Inicialmente centraremos la atención en el diseño conceptual del modelo para finalizar analizando su viabilidad socioeconómica y financiera. Es evidente que la complejidad del tema y la necesidad de información precisa y detallada exigirán la realización de un amplio estudio antes de tomar una decisión que, sin duda, tendrá un gran impacto político. Con este trabajo se pretende establecer el contexto y una metodología adecuada para tratar el tema y ofrecer unos primeros resultados, basados en la información disponible, que sirvan de punto de partida para futuros estudios más ambiciosos, enfocados

a profundizar en el análisis del impacto de esta medida que permitan mejorar o ampliar los resultados obtenidos en el presente estudio.

Uno de nuestros objetivos, por tanto, será realizar un primer análisis de cómo este nuevo concepto de movilidad puede ayudar a reducir los niveles de tráfico y mejorar el entorno urbano de la ciudad; y como puede encajar dentro de la propuesta urbanística de “supermanzanas” desarrollada por el Ayuntamiento de Barcelona. La finalidad del peaje urbano será ayudar a mejorar la salud de las personas y el medioambiente, además de lograr ingresos que puedan revertir en la mejora del transporte público urbano. El nuevo concepto de peaje se aplicará a la ciudad de Barcelona utilizando un modelo de transporte tradicional de cuatro etapas, con el que se simularán los escenarios futuros tras la aplicación de la tarifa. Con ello se pretende averiguar la tarifa de peaje urbano necesaria para conseguir una reducción de tráfico que permita cumplir con los estándares mínimos de calidad del aire fijados por la Unión Europea.

Otro de los objetivos del estudio será analizar y plantear la tecnología que necesitaría este nuevo modelo de peaje urbano. Los últimos avances tecnológicos, tanto en cámaras de reconocimiento de matrículas como en sistemas de posicionamiento GPS, hacen que sea posible aplicar este nuevo esquema tarifario.

Por último, a partir de las estimaciones de coste, demanda con las distintas tarifas, y tiempos de recorridos, en particular, se realizará un análisis de la viabilidad socioeconómica y financiera del nuevo modelo de peaje urbano propuesto.

3. La Unión Europea y los peajes urbanos

En el ámbito de la regulación sobre la tarificación de infraestructuras en entornos urbanos hay que destacar que la Unión Europea, inspirada por los resultados positivos que en las últimas décadas han ofreciendo los sistemas de peaje urbano en funcionamiento¹, ha ido trabajando de forma activa para impulsar y promover la implantación de peajes urbanos en las grandes ciudades del entorno de la UE, como instrumento de gestión decisivo para abordar el problema de la congestión y de la mala calidad ambiental (Carrasco et al., 2012).

La primera referencia sobre la necesidad de implantar sistemas de peaje urbano se plantea de forma clara a través del ya mencionado Libro Blanco de 2001.

“En paralelo al desarrollo de nuevos medios de transporte público, la reducción de la congestión en las ciudades requiere también la instauración de sistemas de tarificación para el uso de infraestructuras en el contexto urbano, cuya expresión más sencilla es la tarificación del aparcamiento. Existen fórmulas más elaboradas que están examinando algunas grandes ciudades, como Londres, creando un sistema de peaje basado en una tecnología de identificación electrónica de los coches y en un sistema electrónico de recogida de cánones, que podrían armonizarse a escala comunitaria. Ahora bien, la población local sólo aceptará los peajes urbanos si las alternativas de transporte público son competitivas en cuanto a servicios

¹ Fundamentalmente, los peajes urbanos nórdicos y del Reino Unido.

e infraestructuras. Por consiguiente, es fundamental utilizar los ingresos obtenidos para contribuir a la financiación de nuevas infraestructuras que mejoren la oferta general de transporte urbano (Libro Blanco, pág. 94)”.

En este sentido, dentro de las medidas prioritarias relativas al fomento de buenas prácticas, el Libro Blanco de 2001 ya recomendaba la implantación de peajes urbanos similares al de Londres. Además, encomendaba a utilizar sus ingresos para potenciar el transporte público urbano y mejorar su aceptabilidad pública.

Dichos pronunciamientos se consolidan y refuerzan a través del Libro Verde de la CE publicado el 25 de septiembre de 2007 “Hacia una nueva cultura de la movilidad urbana”, y más concretamente, a través del “Plan de acción de Movilidad Urbana” que establece una serie de medidas a seguir para el desarrollo de sistemas de peaje urbano. Algunas de ellas son realizar estudios que desarrollen metodologías de cálculo para la internalización de los costes externos urbanos, investigar sobre los tipos de tarifas y tecnologías a aplicar, ver el impacto de la medida en la aceptabilidad pública, así como, desarrollar estudios detallados sobre la eficacia de los peajes urbanos en funcionamiento.

4. El peaje urbano como medio para internalizar las externalidades

Las externalidades derivadas del transporte rodado, además de provocar problemas de salud, generan también problemas económicos y de sostenibilidad ambiental, tanto es así que desde la Unión Europea se insiste en la necesidad de internalizar las externalidades (Libro Blanco del Transporte, 2001). (Robusté, 2002) indica que para el caso concreto del área metropolitana de Barcelona esta internalización significaría un coste adicional de 3,19 céntimos de Euro por viajero-km a los impuestos actuales de 8,23 céntimos de Euro por viajero-km. En la Figura 1 podemos ver gráficamente el desglose de costes sociales para el vehículo privado, donde puede apreciarse que las externalidades (costes y efectos no internalizados por sus usuarios) adquieren una relevancia no despreciable que, como es de esperar, aumenta en función del tráfico.

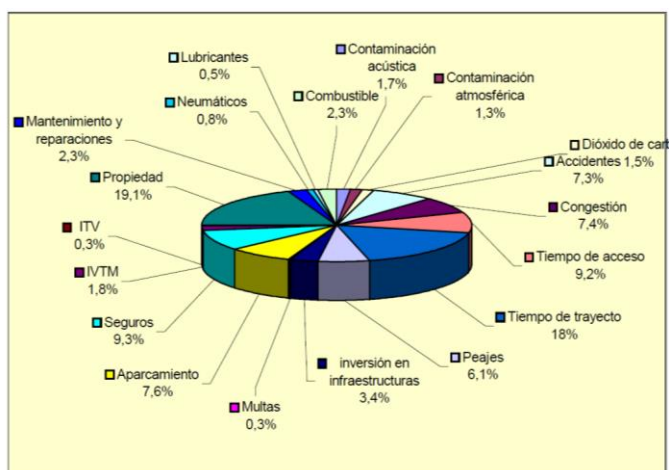


Figura 1. Desglose de los costes sociales (sin impuestos) del vehículo privado. Fuente: (Robusté, 2000).

Por otro lado, en otro estudio, (Robuste, 2001) concluye que el transporte público es 1/3 más económico para la sociedad por viajero-km transportado: 0,77 Euro/v-km en vehículo privado contra 0,51 Euro/v-km en transporte público. No obstante, desde el punto de vista económico, parece evidente apostar por medidas, como la del peaje urbano, que penalizan el uso del vehículo privado y ayudan a transferir viajes hacia el transporte público.

Del total de los costes sociales, algunos son percibidos directamente por el usuario, pero otros no. Estos costes sociales que pasan desapercibidos por los usuarios son los que serían susceptibles de ser internalizados mediante la aplicación de tasas que podrían ligarse al tiempo de trayecto, tiempo de acceso, congestión, accidentes, contaminación atmosférica o acústica. Podemos decir que la sociedad paga una parte de esos costes mediante impuestos, pero esta cantidad es inferior a los costes que genera. La diferencia entre los costes generados y los impuestos revertidos corresponde al valor de las externalidades pendientes de ser internalizadas. Por lo que, se puede concluir que la solución socialmente más justa es internalizar estos costes, a través de una tasa urbana de peaje, para que pague más aquel que más externalidades produce.

En esta línea hemos podido comprobar, a través de la experiencia internacional, que los peajes urbanos no sólo pueden ayudar a reducir la contaminación en ciudades, al reducir la congestión, sino que pueden ser uno de los mejores instrumentos para internalizar los costes derivados de las externalidades producidas por el tráfico, ayudando a mejorar el excedente social. (Santos, 2003) concluyó, después de simular varios cordones de peaje en ocho ciudades inglesas, que la introducción de un peaje urbano puede mejorar el bienestar social siempre que el peaje no sea demasiado alto. Todo esto hace que debamos plantearnos cada vez más implantar en nuestras ciudades sistemas de peajes urbanos que ayuden no sólo a hacer más justo el uso del espacio vial público, haciendo pagar a aquel que más usa y contamina, sino a mejorar la calidad ambiental con la posibilidad de revertir los ingresos generados por el sistema en mejorar el sistema de transporte público y sus infraestructuras.

5. Un nuevo concepto de ciudad para Barcelona

La ciudad de Barcelona es el centro de una de las mayores y más densamente pobladas áreas metropolitanas de Europa. Al igual que otras grandes ciudades de la Unión Europea, uno de sus graves problemas es la contaminación atmosférica, pues supera reiteradamente los niveles máximos de gases contaminantes establecidos en la Directiva 2016/2284 de la Unión Europea (Agència de la Salut Pública, 2018). La necesidad de mejorar la calidad ambiental de la ciudad para dar cumplimiento a las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud ha llevado a que el Ayuntamiento de Barcelona desarrolle una batería de medidas dirigidas a fomentar el uso de medios de transporte más sostenibles, además de optar por un cambio de modelo de gestión urbana que, en algunas zonas, ha restringido hasta el extremo la circulación de automóviles (Gyurkovich, Poklewski-koziell, & Duarte, 2019). A pesar de sus esfuerzos, durante el año 2018, se produjeron en la ciudad de Barcelona 350 muertes prematuras atribuibles a la contaminación atmosférica (Agència de la Salut Pública, 2018), de las que el tráfico rodado es uno de los principales responsables, debido a los contaminantes que genera, principalmente NO, NO₂,

PM₁₀ y PM_{2.5}. Este hecho, sumado a las presiones de ciertos grupos vecinales y de entidades ecologistas y defensores del transporte público, ha llevado a que los actuales dirigentes políticos implementen nuevas medidas que tienen por objeto restringir la movilidad en transporte privado, como la reciente implantación de la zona de bajas emisiones (ZBE), activa desde el 1 de enero de 2020, que prohíbe circular a los vehículos de más de 20 años.

Las autoridades locales se han planteado en algunas ocasiones aplicar un peaje para acceder a la ciudad y así reducir los niveles de contaminación, pero la idea no ha progresado debido, en parte, a una cierta animadversión a los peajes en Cataluña². La nueva propuesta de peaje urbano para Barcelona, a diferencia de los aplicados para construir autopistas, no tiene la finalidad de facilitar la inversión en nuevas infraestructuras y se inspira en el concepto de «ciudad amable»³ y en el modelo urbanístico de supermanzanas⁴ sobre el que el Ayuntamiento de Barcelona lleva años trabajando (Rueda, 2011). El punto clave para la nueva formulación de la movilidad que se plantea es una nueva apreciación del tiempo de viaje. La política de movilidad se ha basado tradicionalmente en la consideración del transporte como una demanda derivada y, por tanto, ha tenido como objetivo básico la reducción del tiempo de viaje, que se ha visto como un tiempo “perdido”, evitando así la dilapidación de recursos de la sociedad. Los ahorros de tiempo suelen valorarse en función del motivo del viaje, asociándolos así a la producción o al bienestar perdidos. Esta valoración, sin embargo, no refleja el comportamiento de los viajeros y, en la realidad, éstos toman decisiones teniendo en cuenta muchos otros aspectos y, en particular, quién paga el viaje (Pons-Rigat, A.; Sauri, S.; Turro, 2017).

En la «ciudad convivial» (Turró, M. 2013), la movilidad está integrada en la vida urbana y no interfiere negativamente en ella, o lo hace lo menos posible. Para ello se plantea restringir la presencia de vehículos en el espacio público. Simplemente eliminando el aparcamiento en la calle, dejándola prácticamente sólo para peatones y vehículos en circulación, y reduciendo radicalmente la velocidad en las vías de proximidad, se podría conseguir recuperar una gran parte de la superficie de la ciudad para usos de mayor utilidad social. La propuesta remite, de alguna manera, al modelo de «supermanzanas» que se ha ido planteando en Barcelona de manera recurrente desde hace décadas y que últimamente se ha visto reforzado con la nueva red ortogonal para los autobuses. Este modelo de segregación se plantea, en nuestro caso, con una nueva filosofía, y aprovechando las oportunidades que ofrecen las nuevas tecnologías.

² Los peajes de las autopistas se han visto con frecuencia como una discriminación con respecto a otras comunidades.

³ Podemos decir que la ciudad amable es aquella que armoniza y equilibra de forma equitativa todas las dimensiones, sistemas y subsistemas de la ciudad y la movilidad

⁴ Es una nueva célula urbana, que tiene unas dimensiones diseñadas a escala de vehículo y no a la escala de peatón, con la que el Ayuntamiento de Barcelona lleva años trabajando. La supermanzana pretende desarrollar un nuevo orden geométrico de la ciudad mediante la agrupación de las manzanas de Cerdà (el caso más usual agrupa 3x3 de las actuales manzanas).

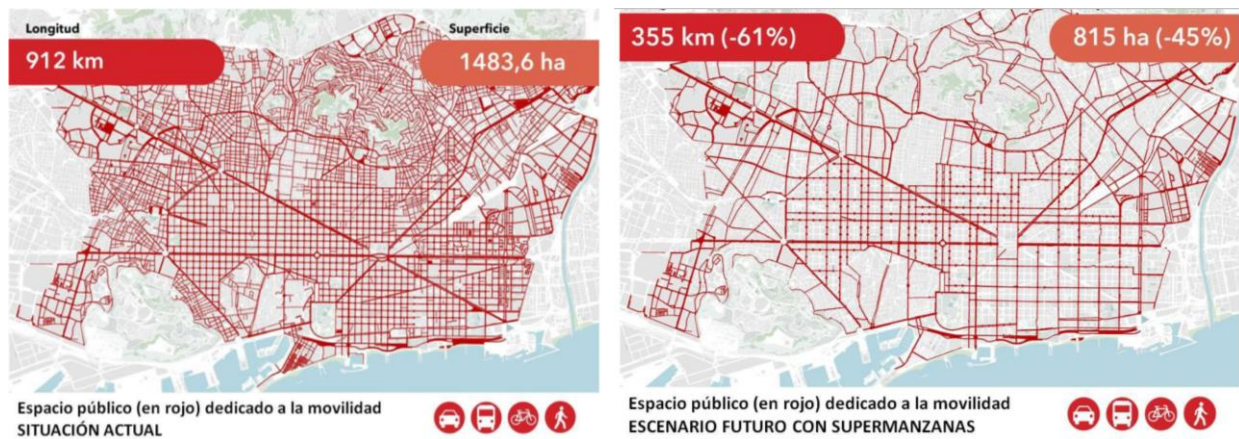


Figura 2. A la izq. la red viaria actual de Barcelona. A la derecha el escenario futuro con supermanzanas. Fuente: Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.

Se definiría una “red básica”, de circulación rápida y de pago que, gracias a la reducción de las molestias del tráfico con la electrificación total (en el futuro) del parque de vehículos y la provisión de aceras adaptadas, podría ser aceptada por los residentes de estas calles, quizás con una compensación en los impuestos, que podría provenir de una parte del pago de los usuarios. Habrá que permitir, en cualquier caso, un cierto acceso a los locales, residentes, etc. de estas calles rápidas y, sobre todo, pensar en las paradas de los autobuses (eléctricos o no contaminantes) que se detendrán. Por otra parte, se debe plantear un diseño de calles y cruces que permita un servicio adecuado al tráfico relativamente rápido que va a circular por esta red.

Las zonas entre vías rápidas deben permitir la recuperación del espacio viario para un uso compartido. Serán zonas peatonales o de tráfico lento que progresivamente irán perdiendo las aceras y recuperando el arbolado y las zonas de uso público, incluyendo terrazas en concesión y similares. Tenemos suficientes ejemplos de estos espacios para poder asegurar su aplicación y seguramente su éxito. La clave es eliminar el aparcamiento y reducir el paso de vehículos al mínimo necesario.

El automóvil se plantea, en un entorno de movilidad inteligente, como el vehículo familiar (“primer coche”) que se utiliza principalmente para viajes interurbanos y algunos viajes urbanos especiales que pidan utilizar un vehículo propio y quizás más grande que los colectivos. El servicio de coche compartido tradicional puede reducir la propiedad de “primeros coches”, pero esto exige profundizar mucho más en el cambio de visión del automóvil como principal objeto de consumo personal y familiar. Los viajes en el vehículo principal normalmente se querrán hacer con rapidez, por lo que utilizarán las vías rápidas de pago. El modelo de pago por uso debe basarse en una fórmula mucho más lógica que la actual, que grava la propiedad, pero no el uso, y deberá vincularse a los efectos externos que produzca el vehículo (ya que, en la ciudad, no podemos relacionarlo con los costes de inversión, como es el caso de las autopistas). La tarificación debería vincularse a la contaminación del vehículo (penalizando los de motor de combustión tradicionales) y podría relacionarse con la congestión de las vías principales (ya que la información sobre la congestión y, por tanto, el tiempo de viaje y coste del desplazamiento serán on-line). No estarán relacionadas con el servicio, puesto que, cuanto más congestión y, por tanto, el tiempo de viaje sea mayor,

se pagará más⁵. Los vehículos de “car-sharing” incorporarán estos costes en su alquiler, que se pagará con el mismo dispositivo (Smart card) que el transporte colectivo y otros servicios urbanos. Los viajeros que no necesiten un servicio motorizado individual (coche/moto privados, coche compartido o taxi) que se pueda considerar rápido, o que no quieran o puedan pagarlo, tendrán siempre las opciones de la marcha a pie, el “bicing”⁶ (motorizado o no) o un transporte colectivo que debe proporcionar un servicio adecuado a toda la zona urbana.

6. Un nuevo modelo de peaje urbano: una red viaria urbana segregada según el nivel de calidad

Actualmente, la mayoría de las ciudades que han implementado sistemas de peaje urbano han diseñado esquemas tarifarios tipo cordón o de área (Echavarrí, 2008). La tarifa fijada, en general, no depende del tiempo de circulación, ni de la distancia que recorre el vehículo dentro del área, ni tampoco de los niveles de congestión o contaminación generados por el vehículo. El control se realiza mediante cámaras de lectura de matrícula ubicadas en los puntos de entrada/salida del área delimitada o, en el caso de tarificación dentro de un área, con cámaras en su interior. Al no depender el pago de la cantidad de viajes (tiempo o distancia) realizados dentro del área, estos esquemas tarifarios no son equitativos y pueden contribuir a la formación de congestión en las zonas de frontera inmediatamente fuera del cordón (May & Milne, 2000).

El modelo de peaje que se plantea para la ciudad de Barcelona plantea tarifas equitativas, basadas en la distancia, y divide la red varia en dos subredes, una básica de pago⁷ que permitiría la circulación a mayor velocidad, siempre dentro del límite de la velocidad urbana, y otra gratuita donde la velocidad de circulación estaría muy limitada. La circulación por la red básica de pago dispondría de mejores ondas verdes al alargar las fases de circulación y aprovechar la mejor coordinación que permite la mayor distancia entre semáforos, mientras que las vías secundarias gratuitas estarían subordinadas a dicha coordinación. Por otro lado, la red de autobuses, ya ortogonal en buena medida, sería adaptada para encajar sus recorridos al nuevo diseño del tráfico urbano. La velocidad comercial de los autobuses sería más elevada, gracias al aumento de la velocidad de circulación, los carriles buses y el diseño de las aceras de estas vías (sin aparcamiento y permitiendo, en la derecha de la marcha, un acceso fácil a los buses).

⁵ No es, por tanto, planteable un modelo comercial convencional. Lo que implica, por lo menos, una fuerte regulación por parte del sector público.

⁶ El Bicing es un servicio de alquiler de bicicletas públicas en la ciudad de Barcelona que se implantó en marzo de 2007, promovido por el Ayuntamiento que utiliza un sistema de estaciones y bicicletas similar al de Estocolmo, Oslo o BiZi de Zaragoza.

⁷ Esta red coincidiría con la red básica del modelo urbanístico de supermanzanas impulsado por el Ayuntamiento de Barcelona.

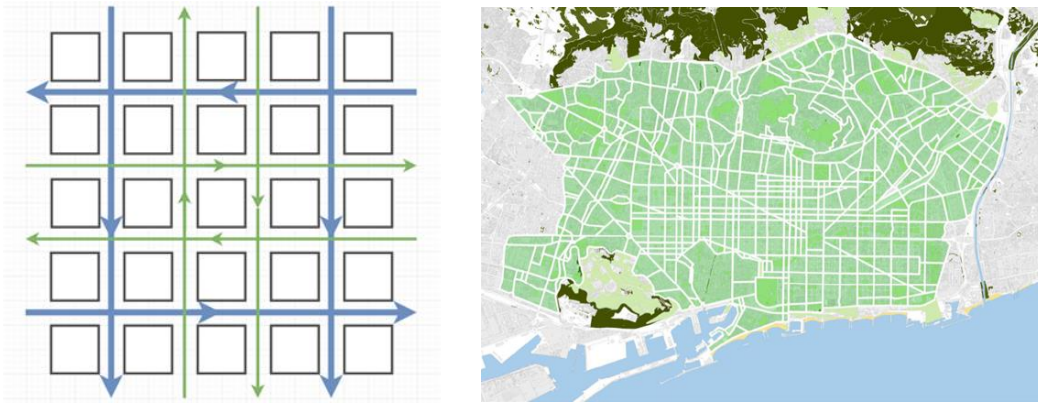


Figura 3. A la izquierda, en color azul la red básica de pago y en color verde la red secundaria gratuita. A la derecha propuesta de red de peaje urbano para Barcelona soportada sobre la red básica del modelo urbanístico de supermanzanas.

El peaje como precio por un servicio (“service pricing”) fue ya propuesto por (Robusté, 2002) para el caso de peajes interurbanos, donde se presenta al usuario del peaje como comprador de un servicio de calidad. En este caso, se aplica el concepto en un entorno urbano, de mayor complejidad. Se supone, en todo caso, que el aumento del nivel de calidad de la red básica llevará a la aceptación social del modelo de peaje propuesto, sobre todo teniendo en cuenta que las tarifas a aplicar deben ser solo disuasivas para aquellos viajes que pueden evitarse o realizarse en modos de transporte sostenibles.

7. El sistema tecnológico del nuevo modelo de peaje urbano

Para poner en práctica el nuevo modelo de peaje urbano basado en la distancia será necesario recurrir a la tecnología satelital GNSS⁸ y a las comunicaciones móviles e inalámbricas (Zabic, 2011). Cada vehículo deberá tener instalado un transpondedor OBU⁹ con comunicaciones móviles y GPS, capaz de almacenar como mínimo, para cada viaje, la siguiente información: hora y fecha de inicio-fin de viaje, duración, distancia recorrida y peaje a pagar. En futuro, con el despliegue de las redes 5G y el desarrollo de las comunicaciones C-V2X, que darían la posibilidad de que los automóviles se comunicaran no sólo con el equipamiento urbano inteligente sino también con peatones, vehículos y redes móviles, se espera que los fabricantes de automóviles tengan integrados estos equipos, lo que reducirá sus costes de implantación. Este tipo de comunicaciones abren la puerta a novedosos mecanismos que tienen por objetivo simplificar la tarea de conducción y aumentar la seguridad vial. Así, a través de estas redes será posible que el vehículo ofrezca asistencia al conductor o que, incluso, se pueda alcanzar una conducción automática.

Gracias a estos nuevos sistemas de comunicaciones el vehículo no sólo incorporaría los datos de su propio viaje, sino que podría incorporar datos de la propia infraestructura (estado de los semáforos, conteo de espiras, parámetros ambientales de las estaciones meteorológicas, etc.). La enorme cantidad de datos generados por el sistema se gestionaría desde un potente centro de control de tráfico. Sería posible

⁸ Son las siglas en inglés de Global Navigation Satellite System para referirse a los sistemas globales de navegación por satélite como el Navstar-GPS, Glonass o Galileo.

⁹ Son las siglas en inglés de On Board Unit para referirse a un dispositivo embarcado en el vehículo con capacidad para comunicarse con otros dispositivos, pudiendo llegar incluso a transmitir su posición.

también utilizar, como alternativa al OBU, el teléfono móvil. Los temas de privacidad y de posibles fallos (no disponibilidad del teléfono, uso inadecuado, etc.) deberán tratarse, en este caso, con la debida atención. Con un simple equipamiento adicional¹⁰, el sistema permitiría ligar la tarifa al nivel de contaminación generado por cada vehículo e incluso relacionarlo con los índices de polución de la ciudad. En este nuevo contexto, podrían surgir nuevas vías de negocio para las operadoras de telefonía móvil que podrían informar en tiempo real a los conductores sobre servicios a lo largo del itinerario del viaje. Es decir, se abriría la puerta al pago centralizado de servicios como estacionamientos, lavado de vehículos, combustible, publicidad,

A continuación, se presenta un esquema de la arquitectura general del modelo de peaje urbano propuesto. En todo caso el rápido avance de las telecomunicaciones hace que sea solo en el momento de la implementación del peaje cuando pueda concretarse la tecnología más idónea. Lo relevante en el momento es demostrar que ya existe actualmente la posibilidad de materializar el proyecto desde el punto técnico.

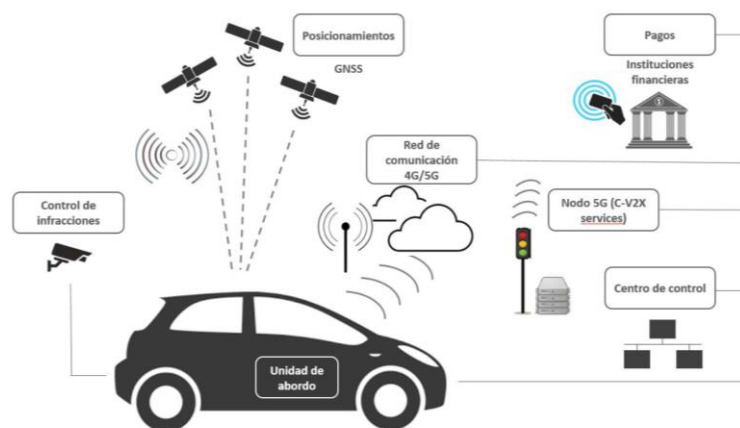


Figura 4. Esquema general del nuevo sistema de peaje urbano. Fuente: Elaboración propia.

El sistema del nuevo modelo de peaje urbano estaría formado por diferentes subsistemas que a continuación detallaremos y que, en líneas generales, serían los siguientes: OBU H-Mobility, un subsistema de seguimiento y localización de vehículos (SLV), un subsistema de vigilancia ambiental (SVA), un subsistema de control e infracción de paso (SCI) y un subsistema de cobro (SC).

a. La unidad embarcada “OBU H-Mobility”

Ya se ha comentado la necesidad de que todos los vehículos en circulación dispusieran de un transpondedor o unidad embarcada (OBU) con GPS integrado y conexión a internet. Con este dispositivo, que llamaremos “OBU H-Mobility”, se podría saber en todo momento la posición de los vehículos, consumos, tipo de conducción, horarios de desplazamiento, así como la tarificación y coste del viaje. Además, el dispositivo podría prestar a los usuarios servicios adicionales (*avisos de tráfico, pago de*

¹⁰ Consistiría en un pequeño dispositivo con comunicaciones inalámbricas, conectado al puerto OBD-II del vehículo, que permitiría medir y transmitir los datos del consumo de combustible y las emisiones contaminantes generadas.

estacionamientos, o cualquier otra transacción de pago electrónica dentro de la ciudad con establecimientos adheridos). En la siguiente figura se muestra a la izquierda un ejemplo del servicio reportado por la unidad de abordo y a la derecha un diagrama del procesamiento de datos de la unidad embarcada.

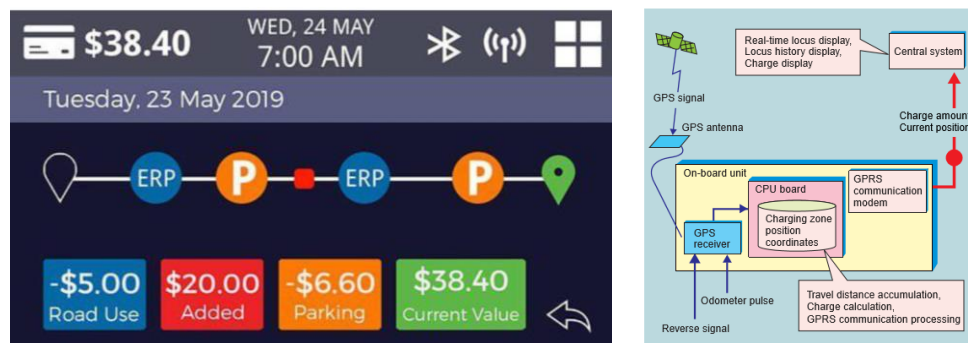


Figura 5. Servicio y diagrama de procesamiento del dispositivo OBU. Fuente: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

La unidad de abordo estaría compuesta de un receptor GPS, una placa CPU y un módem de comunicación 4G, en un futuro 5G, para comunicarse con el sistema central o centro de control. La antena, que recibiría la señal de los satélites GPS, Glonass o Galileo, estaría conectada al receptor GPS y al odómetro¹¹ del vehículo. El receptor GPS estaría equipado con un sensor uniaxial de velocidad de giro que permitiría obtener la dirección de desplazamiento del vehículo. Esta unidad de abordo recibiría los datos de posicionamiento del receptor GPS, en intervalos de un segundo, y calcularía el coste del peaje si el vehículo hubiera pasado por una zona tarifada. Al entrar en una zona de peaje la distancia de recorrido se acumularía hasta que el vehículo abandonase dicha zona, instante en el cual la unidad de abordo calcularía el coste del peaje. La distancia de recorrido en la zona y el importe del peaje se transmitirían al sistema central de control, a través de la red de comunicaciones 4G/Wifi. La unidad de abordo, por tanto, almacenaría los datos de posicionamiento recibidos desde los satélites, la distancia de viaje acumulada y el importe del peaje en su memoria interna. El sistema central recibiría estos datos y los almacenaría en su base de datos. Gracias a este proceso no sería necesario que el sistema central generase los datos de posicionamiento ni seguimiento vehicular, por lo que las comunicaciones se verían menos afectadas incluso si el número de unidades embarcadas aumentase.

b. Subsistema de Seguimiento y Localización de Vehículos (SLV)

El objetivo de este subsistema sería, con la ayuda del dispositivo “OBU H-Mobility, el cálculo de la posición y distancia recorrida de cada vehículo dentro del área delimitada por el peaje urbano.

¹¹ Un odómetro es un instrumento de medición que calcula la distancia total o parcial recorrida por un cuerpo (generalmente por un vehículo) en la unidad de longitud en la cual ha sido configurado (metros, millas). Su uso está generalizadamente extendido debido a la necesidad de conocer distancias, calcular tiempos de viaje, o consumo de combustible.



Figura 6. Ejemplo de equipo de abordaje e integración en vehículo y “smartphone”. Fuente: TomTom Telematic.

La aplicación que gestionaría este subsistema mostraría al usuario las diferentes alternativas de viaje y su respectivo coste (en la Figura 7 se muestra propuesta del entorno). El dispositivo embarcado enviaría en tiempo real los datos del viaje hacia un servidor; además este dispositivo podría almacenar estos datos para garantizar, en el caso de pérdida de comunicación, su envío hacia el centro de control. Este centro de control también tendría la función de asistencia al viaje, donde los operadores de sala podrían interactuar con el usuario proponiéndole rutas más rápidas y económicas, ayudándole a la movilidad, comunicación de emergencias, etc.

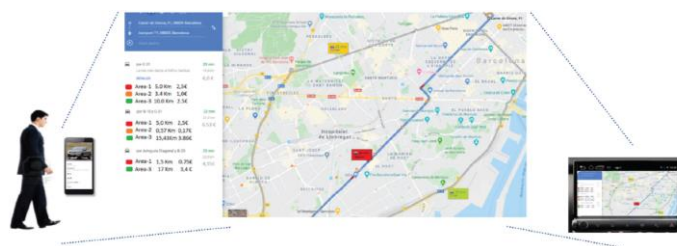


Figura 7. Representación de los distintos costes en función de la alternativa de viaje.

Todos los recorridos podrían visualizarse tanto desde el centro de control de tráfico como desde el vehículo o “smartphone”. Estos recorridos serían encriptados y almacenados. El registro podría ser accesible a los usuarios a través de su perfil específico. El sistema, además, podría realizar alertas cuando detectara vehículos fuera de un área previamente delimitada. Esta funcionalidad sería útil para días donde se produjeran en la ciudad eventos especiales o en periodo de obras donde fuera necesario delimitar y/o restringir una zona al tráfico. Todos los datos generados por el sistema serían procesados y analizados y permitirían a la ciudad disponer de patrones de movimientos. Estos se podrían utilizar para beneficiar a conductores con comportamientos eficientes de conducción e incluso para alertar a los centros de seguridad pública local o nacional sobre movimientos sospechosos de determinados vehículos. Con esta información se podrían generar informes de datos de viajes fiables y fáciles de comprender que incluirían información sobre las horas de salidas y llegadas, el tiempo de conducción, el tiempo que los vehículos están parados, distancias recorridas, ... Estos informes podrían ser enviados mensualmente a los usuarios del peaje que de forma fácil y sencilla tendrían los datos de sus viajes urbanos.

c. Subsistema de vigilancia ambiental (SVA)

Como medida adicional se podría controlar el consumo de combustible y el coste ambiental generado por cada vehículo en la ciudad. Para ello, sería necesario instalar adicionalmente en el vehículo un dispositivo que llamaríamos H-ECO-Movilidad. Este dispositivo se conectaría por el puerto OBD¹² del vehículo. Con este nuevo dispositivo lograríamos información sobre las emisiones de CO₂ y consumos de combustibles de los vehículos en circulación.



Figura 8. Ejemplo de dispositivo H-ECO Movilidad.

Además, este sistema se concibe con un enfoque combinado con los Servicios de Monitoreo Atmosférico de Copernicus¹³ (CAMS) y los Servicios de Cambio Climático (C3S) de tal manera que, con la ayuda de métodos de inteligencia artificial, a partir del análisis de los flujos de gestión del transporte se pudiera pronosticar la calidad del aire en diferentes zonas de la ciudad. Este hecho permitirá una visión de la gestión del tráfico global rápida e inteligente, viendo su impacto en tiempo real sobre el medio ambiente, proporcionando a los responsables datos objetivos con los que recomendar modificaciones de las tarifas de peaje o incluso sugerir cambio del medio de transporte.

d. Subsistema de Control e Infracción (SCI)

Para circular dentro de la zona urbana afectada por el peaje, los usuarios deberían estar previamente registrados dentro del sistema para poder realizar el pago electrónico del servicio. Este registro, que se podría realizar vía “web” o mediante “smartphone”, generaría una base de datos con todos los vehículos autorizados para circular. Gracias a este registro el subsistema de control e infracción (SCI), formado por una serie de cámaras con reconocimiento automático de matrículas, se encargaría de sancionar a aquellos vehículos no autorizados. Estas cámaras, conectadas a un mini PC, formarían parte de un sistema que estaría continuamente verificando las matrículas de todos los vehículos en circulación. A nivel de arquitectura de sistema se propone una arquitectura distribuida para que, en caso de caída del sistema, se garantice el continuo almacenamiento en local de las infracciones.

¹² OBD (*On Board Diagnostics*) es un sistema de diagnóstico a bordo en vehículos (coches y camiones). Actualmente se emplean los estándares OBD-II (Estados Unidos), EOBD (Europa) y JOBD (Japón) que aportan un monitoreo y control completo del motor y otros dispositivos del vehículo. Los vehículos pesados poseen una norma diferente, regulada por la SAE, conocida como J1939.

¹³ Copernicus es una iniciativa conjunta de la Comisión Europea y de la Agencia Espacial Europea. El principal objetivo de Copernicus consiste en observar el medio ambiente para entender mejor los cambios ambientales que se producen en la tierra, el porqué de estos cambios, su influencia en nuestras vidas y de ese modo contribuir a la protección del medio ambiente, la salud y seguridad de los ciudadanos. Para más información se puede consultar la web: <https://www.copernicus.eu/es>.

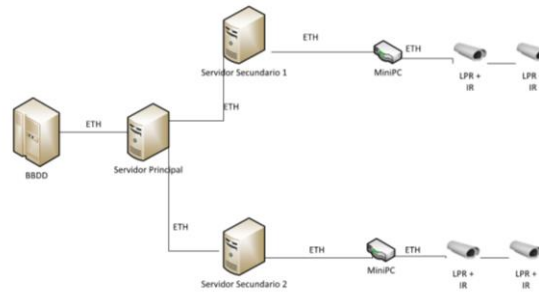


Figura 9. Ejemplo de arquitectura del subsistema (SCI). Fuente: Elaboración propia.

e. Subsistema de cobro (SC)

La realización del pago del peaje se realizaría mediante una plataforma tecnológica que habilitaría los servicios interactivos entre el conductor y el titular de la vía. El dispositivo de posicionamiento por satélite (con tecnología GNSS) podría ser el medio por el cual se realizaría el pago por uso del peaje urbano. Este dispositivo podría utilizar el propio dispositivo OBU o bien un teléfono móvil inteligente como soporte para realizar el pago electrónico. En la Figura 10 se muestra ejemplo con la propuesta de diseño del proceso de pago.

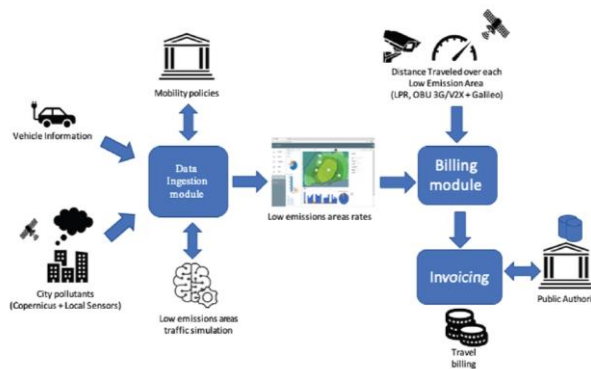


Figura 10. Representación del proceso para el pago de la tasa de peaje.

En el caso de que el usuario quisiera realizar el pago mediante el teléfono inteligente, se debería descargar una aplicación, a través de los sistemas operativos iOS o Android, donde se registraría con sus datos personales y vincularía una tarjeta bancaria; el registro se validaría mediante la llegada de un correo electrónico; posteriormente se completarían los datos del vehículo y se añadirían tantas matrículas como fuese necesario; por último, se introducirían los datos de la tarjeta para efectuar el pago.

f. Integración de los diferentes subsistemas

Estos subsistemas se integrarían dentro de una única plataforma interoperable “smart mobility”, que seguiría las recomendaciones de la normativa UNE 178104:2017 que marca los requisitos de interoperabilidad de las plataformas “Smart-City”, gobernada desde un potente centro de control de tráfico,

que permitiría un control global del sistema. La realización del pago del peaje se realizaría mediante una plataforma tecnológica que habilitaría los servicios interactivos entre el vehículo (o el conductor) y el titular de la vía o servicio



Figura 11. Integración de subsistemas en plataforma “Smart Mobility”.

8. Metodología para analizar la viabilidad del nuevo modelo de peaje urbano para Barcelona

Para poder analizar la viabilidad socioeconómica y financiera del nuevo esquema de peaje, primero hemos tenido que cuantificar su impacto potencial sobre el tráfico urbano de la ciudad. Para ello, ha sido necesario establecer un modelo de estimación de la demanda. El modelo tradicional de cuatro etapas permite predecir de una manera razonable el tráfico privado en la red, con y sin la condición externa de peaje¹⁴(Castiglione J., Bradley M., 2014). El modelo se ha construido en Transcad¹⁵ y para su desarrollo se ha contado con el apoyo de la base de datos de BCN Ecologia¹⁶, empleando una zonificación básica de la ciudad. Ha sido posible calibrarlo, de manera que simula razonablemente bien la movilidad actual en vehículo privado de la ciudad.

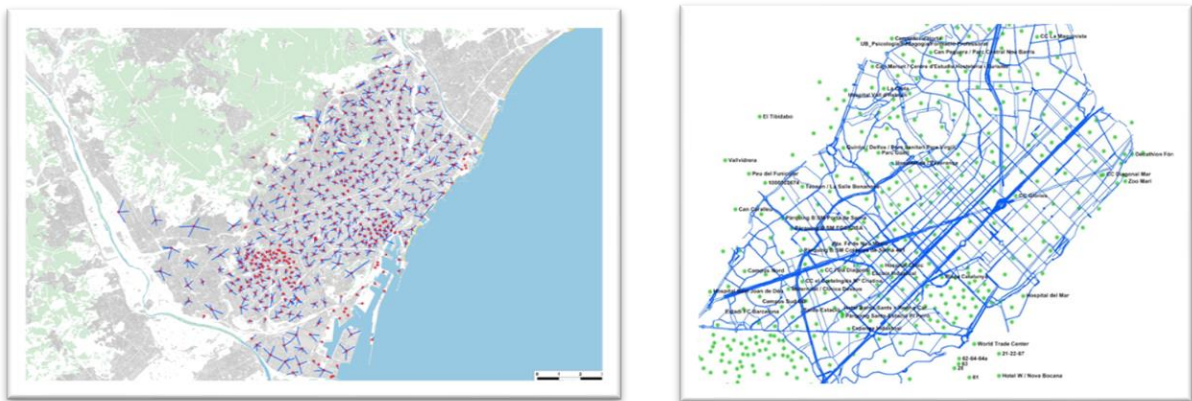


Figura 12. Representación en Transcad del modelo de tráfico de Barcelona.

¹⁴ Se han analizado 3 escenarios tarifarios con las tarifas de 9, 16 y 30 cts/km.

¹⁵ TransCAD es un software de modelación de demanda de viajes.

¹⁶ BCNEcologia es un Consorcio público formado por el Ayuntamiento de Barcelona, Área Metropolitana de Barcelona (AMB) y la Diputación de Barcelona que realiza proyectos dentro del ámbito de la movilidad destinados a instituciones públicas, fundaciones, organizaciones y empresas de ámbito nacional e internacional.

La cantidad de viajes atraídos y generados proviene de la Encuesta de Movilidad Cotidiana (EMQ)¹⁷ realizada por la Autoridad de Transporte Metropolitano de Barcelona. La matriz origen-destino empleada ha contado con más de 2,8 millones de desplazamientos diarios en modos motorizados, incluyendo viajes internos en Barcelona y de conexión con Barcelona. Para la asignación del tráfico, se ha segregado previamente la matriz de viajes de vehículos privados en función de los distintos motivos de desplazamientos a los que se han adjudicado valores del tiempo de viaje (según Figura 13) basados en un estudio realizado por la “Autoritat del Transport Metropolità de Barcelona” para TRAM¹⁸ en el año 2006.

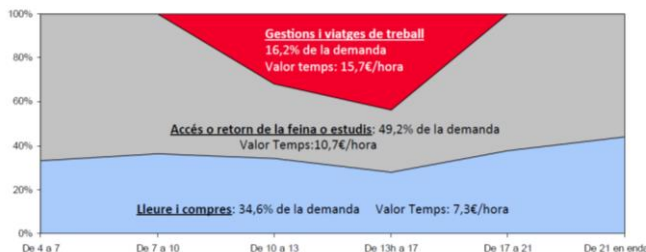


Figura 13. Valor del tiempo en base a encuestas entre usuarios de Trambaix y Trambesós 2009. Fuente: Autoritat del Transport Metropolità de Barcelona (ATM).

Para garantizar una mejor consistencia y convergencia del modelo a la hora de comparar escenarios, se ha resuelto el problema de asignación mediante el método de equilibrio del usuario (UE). Una vez modelado el escenario actual se ha podido estimar, a través de la variación de ciertos indicadores, como el número de viajes o los kilómetros recorridos, el impacto de introducir diferentes tarifas de peaje en la red básica. La redistribución de viajes se representa a continuación.

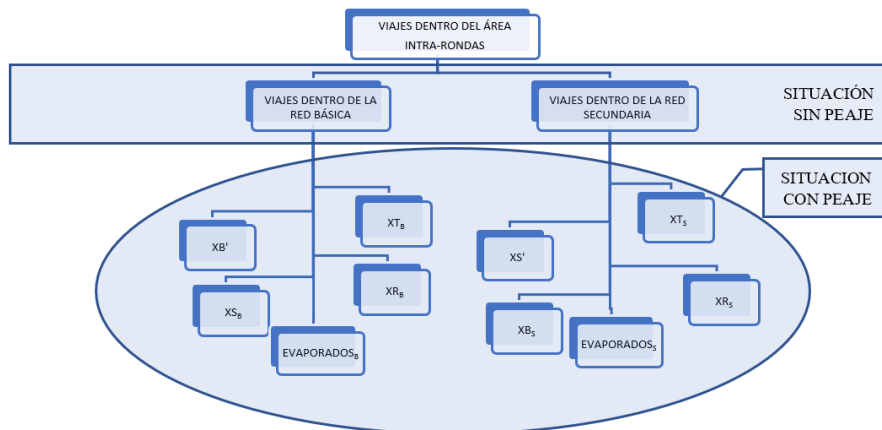


Figura 14. Distribución de viajes en el área de intra-rondas antes y después del peaje.

En la situación con peaje, XB' representa los viajes que permanecen en la red básica (los que pagan y los exentos); XS_B los viajes que proceden de la red básica y se desvían a la a red secundaria; XR_B los

¹⁷ La Encuesta de Movilidad Cotidiana (EMQ) es una iniciativa de la Autoridad del Transporte Metropolitano (ATM) con el objetivo de conocer quinquenalmente la movilidad de la población de la Región Metropolitana de Barcelona que permitan analizar los patrones de movilidad en función de las características de la población y de los diferentes territorios. Bajo este criterio, los años 1996 y 2001 se realizaron las dos primeras ediciones.

¹⁸ TRAM es una empresa concesionaria de la Autoridad del Transporte Metropolitano de Barcelona (ATM) de transporte público que gestiona las dos redes actuales de tranvías en la Región Metropolitana de Barcelona.

viajes procedentes de la red básica y que pasan a desplazarse fuera del área intra-rondas; XT_B los viajes que proceden de la red básica y que se transfieren a modos alternativos de transporte (transporte público, a pie, bicicleta); XS' los viajes que permanecen en la red secundaria; XB los viajes procedentes de la red secundaria que utilizan la red básica; XR_S los viajes procedentes de la red secundaria que se han desplazado fuera del área intra-rondas; XT_S los viajes que proceden de la red secundaria y que se han transferido a modos alternativos de transporte (transporte público, a pie, bicicleta). Por último, los $evaporados_B$ son los viajes de la red básica que se dejan de hacer y los $evaporados_S$ los de la red secundaria que ya no hacen.

La tabla 1 proporciona una síntesis de los resultados obtenidos con el modelo de simulación para diferentes opciones tarifarias.

Tabla 1. Valor de los indicadores para los distintos escenarios tarifarios

Indicador	Escenario base		Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	Red básica	Red secundaria	Red básica	Red secundaria	Red básica	Red secundaria	Red básica	Red secundaria
Tarifa peaje (cts/km)	0	0	9	0	16	0	30	0
Veh-km (*10 ⁶)	12,5	2,7	10,8	3,8	9,8	4,6	8,6	5,4
Vm (km/h)	26,2	22,8	32,5	19,4	36,3	17,3	42	9,8

El argumento para la aceptabilidad del peaje urbano se apoyaría en la disminución del número de viajes o de veh-km equivalentes en vehículo privado y, por ende, la congestión, de manera que los viajeros actuales que continúen utilizando el automóvil, o sea aquellos que están dispuestos a asumir el desembolso adicional que representa el peaje, perciban una mejora de la calidad del servicio, mientras que los demás tengan opciones aceptables, ya sea con trayectos alternativos más lentos o, preferiblemente, utilizando el transporte colectivo u otros modos menos generadores de externalidades, que mejoran sus prestaciones¹⁹.

Puesto que el modelo de transporte Transcad no contempla la transferencia de viajes desde el vehículo privado hacia otros medios de transporte (fundamentalmente transporte público), para estimar los viajes transferidos hacia el autobús y los modos ferroviarios, se ha tenido que aplicar un modelo de reparto modal desacoplado de la asignación. El modelo de reparto modal que hemos utilizado fue realizado por la empresa Mcrit²⁰ en el año 2008, fruto de un estudio realizado para la “Generalitat de Catalunya- Departament de Política Territorial i Obres Públiques” denominado “Modelización del reparto modal en el continuo urbano central de Barcelona (CUCB)”²¹. El fundamento teórico sobre el que se basa este modelo de reparto es que los viajeros, al enfrentarse a varias alternativas modales, le asignan una utilidad a cada una de ellas y eligen la que la maximiza. Esta percepción de los usuarios sobre los diferentes modos de transporte está soportada por una campaña específica de encuestas de preferencias declaradas con la que se intentó averiguar los factores que influían en la elección modal y en la disponibilidad a pagar.

¹⁹ La velocidad comercial de los autobuses y la seguridad para bicicletas y peatones aumentarían notablemente.

²⁰ MCRIT SL. (www.mcrit.com) es una empresa de ingeniería de transporte fundada en 1988 por ingenieros de la Universidad Politécnica de Cataluña- Barcelona Tech interesados en la evaluación del impacto de políticas y actuaciones en el sector”.

²¹ CUCB (Continuo Urbano Central de Barcelona): es el ámbito de estudio del modelo que agrupa aquel territorio que es o será utilizado por el transporte público (medios ferroviarios y/o autobús).

Los efectos de la aplicación del peaje urbano sobre el tráfico de Barcelona es el factor crítico en el análisis de la viabilidad de la medida, pero hay algunos parámetros, como los valores que se asignen a los ahorros de tiempo, que tienen una incidencia importante en los resultados esperados. Debido a las limitaciones de los modelos utilizados y con el fin de acotar los riesgos asociados a la incertidumbre en la cuantificación de las variables de mayor peso en el análisis socioeconómico y financiero, se han realizado una serie de análisis de sensibilidad, con simulaciones de Montecarlo utilizando el software @Risk²², para ver cómo afectan esas variables a la robustez de los indicadores de rentabilidad.

9. Resultados del estudio socioeconómico

El análisis coste-beneficio (ACB) del proyecto ayudará a tomar decisiones, al permitir comparar el beneficio social esperado con el coste de oportunidad de la inversión. Los ingresos del nuevo sistema de peaje deberían ser capaces de cubrir los costes de financiación y mantenimiento del proyecto y dejar un margen para que el ayuntamiento pueda aplicarlo a políticas de transporte sostenible. Se ha adoptado un ciclo del proyecto de diez años, adaptado a un entorno que es tecnológica y políticamente muy cambiante. A continuación, se presenta una síntesis de los resultados obtenidos para el primer año, sin tener en cuenta el efecto del coste marginal de los fondos públicos y repercutiendo la totalidad de la inversión²³ al año inicial.

Tabla 2. Desglose de los beneficios y costes en millones de euros para el primer año del sistema de peaje urbano en Barcelona.

1. Efectos del peaje urbano sobre el sistema de transporte	Tarifa del peaje		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30(cts/km)
1.1 Ahorro del tiempo de los viajeros en VP que utilizan el PU.	116	186	220
1.2 Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que no usan el PU.	-4	-10	-21
1.3 Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que pasan al TP.	-30	-53	-74
1.4 Pérdida de bienestar de los viajeros desplazados del área intra-rondas.	-13	-27	-83
1.5 Ahorro de costes de funcionamiento del VP.	24	42	58
1.6 Costes de inv. y operación del TTP adicional para atender el cambio modal.	-17	-30	-41
Subtotal 1	76 m€	108 m€	59 m€

2. Costes del sistema de peaje urbano	Tarifa del peaje		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30(cts/km)
2.1 Inversión	-94	-94	-94
2.2 Mantenimiento del peaje urbano	-3	-3	-3
2.3 Explotación y operación del peaje urbano	-7	-7	-7
Subtotal 2	-104 m€	-104 m€	-104 m€

²² @Risk es un complemento para Microsoft Excel que permite realizar simulaciones de Montecarlo para acotar riesgos.

²³ Se ha estimado una inversión inicial del proyecto valorada en 94 m€ de los cuales 47m€ irían destinados a la adquisición de los dispositivos OBU para los usuarios de vehículo privado residentes en Barcelona.

3. Externalidades ambientales	Tarifa del peaje		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30(cts/km)
3.1 Cambio climático	2	4	6
3.1 Polución atmosférica	5	7	11
3.2 Ruido	5	8	12
Subtotal 3	12 m€	19 m€	29 m€

4. Efecto del peaje urbanos sobre la salud de las personas (M€)	Tarifa del peaje		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30(cts/km)
4.1 Mejora de la salud por incremento del ejercicio físico (p.e. caminar)	21	37	51
Subtotal 4	21 m€	37 m€	51 m€

Los anteriores resultados se sintetizan en el siguiente cuadro-resumen:

Tabla 3. Resumen de los beneficios y costes en millones de euros para el primer año del sistema de peaje urbano en Barcelona.

	Tarifa del peaje		
	9 (cts/km)	16 (cts/km)	30(cts/km)
1. Efectos del peaje urbano sobre el sistema de transporte	76	108	59
2. Costes del sistema de peaje urbano	-104	-104	-104
3. Externalidades ambientales	12	19	29
4. Efectos sobre la salud de las personas	21	37	51
Beneficio total neto en el primer año (m€)	5 m€	60 m€	35 m€

A la vista de los resultados obtenidos podemos decir que, a pesar de que cualquier escenario tarifario²⁴ arroja resultados positivos ya el primer año, incluso repercutiéndole toda la inversión, una tarifa de unos 16 cts/km sería la que previsiblemente generaría un mayor beneficio social. El aumento de la tarifa es tan disuasorio que reduce substancialmente los beneficios sobre la congestión, que ya se generan con tarifas inferiores. La rentabilidad de la inversión para esa tarifa más conveniente, de 16 cts/km, se ha analizado para el periodo de 10 años. Para ello se han hecho una serie de hipótesis, como que la ejecución del proyecto se realizará en dos años y que el tráfico permanecerá constante los tres primeros años para después aumentar a razón de un 1% anual²⁵. A continuación, se exponen los resultados obtenidos para los valores de referencia que muestran que el proyecto genera una rentabilidad socioeconómica extremadamente elevada.

²⁴ Nótese la contribución positiva de los efectos del peaje sobre el sistema de transporte para cualquier escenario tarifario. La mejora de la velocidad de circulación en la red básica genera unos ahorros de tiempo suficientes para compensar la pérdida de tiempo de aquellos viajeros que optan por no pagar el peaje urbano, parte de los cuales se beneficiarían indirectamente de la previsible mejora de la velocidad de circulación del sistema de autobuses urbanos.

²⁵ Los efectos sobre la reducción del volumen de tráfico del peaje urbano de Estocolmo se mantuvieron más o menos estables cinco años después de su aplicación (Börjesson et al., 2012).

Tabla 4. Resumen de los beneficios y costes en millones de euros para un ciclo del proyecto de 10 años y una tarifa de 16 cts/km.

	VAN (m€)	AÑOS									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. EFECTO SOBRE EL TRANSP. DERIVADOS DE LA IMPLANTACIÓN DEL PU	660	0	0	141	146	155	163	170	167	159	150
1.1. Ahorro del tiempo de los viajeros en VP que utilizan el PU				227	227	225	220	214	205	195	185
1.2. Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que no usan el PU				-8	-7	-5	-4	-1	-0	-0	-0
1.3. Pérdida de bienestar de los viajeros en VP que pasan al TP				-43	-38	-29	-19	-7	-2	-1	-0
1.4. Viajeros desplazados del área intra-rondas				-23	-23	-23	-23	-23	-24	-24	-25
1.5. Ahorro de costes de funcionamiento del VP				23	23	23	23	23	23	24	25
1.6. Costes de inversión y operación del TP adicional para atender el cambio modal				-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35	-35
2. COSTES DEL SISTEMA DE PEAJE URBANO	-151	-57	-37	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
2.1. Inversión		-57	-37								
2.2. Mantenimiento del peaje urbano		0		-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
2.3. Explotación y operación del peaje urbano		0		-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7
3. EXTERNALIDADES AMBIENTALES	63	0	0	20	20	20	20	20	20	21	22
3.1. Cambio climático				4	4	4	4	4	4	4	4
3.2. Polución				7	7	7	7	7	8	8	8
3.3. Ruido				8	8	8	8	8	9	9	9
4. EFECTO SOBRE LA SALUD DE LAS PERSONAS	152	0	0	37	37	38	39	41	42	45	47
4.1. Beneficio por el aumento de ejercicio físico				37	37	38	39	41	42	45	47
BENEFICIO (m€)		-57	-37	188	193	203	212	220	220	215	209
VAN (m€)	725M€										
TIR (10 años)	119%										

Como ya se ha comentado, debido a las limitaciones de ciertos modelos y valores utilizados, además, para delimitar los riesgos, se ha analizado la rentabilidad socioeconómica del proyecto acotando estadísticamente esos parámetros de referencia mediante una simulación de Montecarlo. Los distintos factores se han convertido en variables aleatorias asignándoles una función de probabilidad²⁶ con un rango de valores centrados al adoptado en el análisis de referencia. La varianza de las funciones probabilísticas utilizadas como el valor del tiempo, el número²⁷ de viajes que pasan del vehículo privado hacia el transporte público y la inversión se definen con criterios de razonabilidad, a partir de ciertos estudios y la experiencia de algunos expertos consultados. En la siguiente tabla se muestra un resumen con los valores probabilísticos utilizados:

²⁶ Para las distintas variables se ha utilizado la función de densidad de probabilidad Pert, similar a la triangular, pero con sus colas suavizadas. Presenta un valor mínimo (a), máximo (b) y una moda (c) de modo que es 0 para los extremos (a, b), y sensiblemente afín entre cada extremo y la moda. A pesar de que la función que mejor se adapta a los valores de tiempo de viaje es la lognormal (Turró, 1979), la función probabilística adoptada ha sido también la Pert para facilitar el análisis (sin introducir efectos relevantes).

²⁷ Para definir el rango de valores de los viajes que se transferían desde el vehículo privado hacia el transporte público nos hemos apoyado en el estudio realizado en diciembre de 2019 por el RACC (Reial Automòbil Club de Catalunya) sobre el impacto de la zona de bajas emisiones de Barcelona en la demanda de transporte público.

Tabla 5. Resumen del rango de valores de las variables aleatorias definidas.

Variables aleatorias	Valor más probable (moda)	Valor mínimo	Valor máximo
(Valor del tiempo (€/h) de los viajes que utilizan el peaje urbano) ²⁸	13,2	10,7	15,7
(Valor del tiempo (€/h) de los viajes que no utilizan el peaje urbano) ²⁹	9	7,3	10,7
(Porcentaje de viajes intra-rondas expulsados de la red de peaje que pasan del vehículo privado al transporte público (%)) ³⁰	(84/85/87) ³¹	50	100
Inversión (M€) ³²	94	80	110

Una vez definidos los rangos de valores de las variables aleatorias se ha asignado a cada factor clave su respectiva función de densidad de probabilidad. Para cada distribución de probabilidad se han realizado diferentes muestreos (método de Montecarlo) con los que se ha recalculado todo el análisis coste-beneficio, cada vez con un grupo diferentes de valores posibles, realizando 100.000 iteraciones de forma aleatoria dentro de la función probabilística descrita. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el escenario tarifario de 16 cts/km:

²⁸ El rango de valores utilizados para los valores de tiempo se basa en la Figura 13 según encuestas entre usuarios de Trambaix y Trambesós 2009.

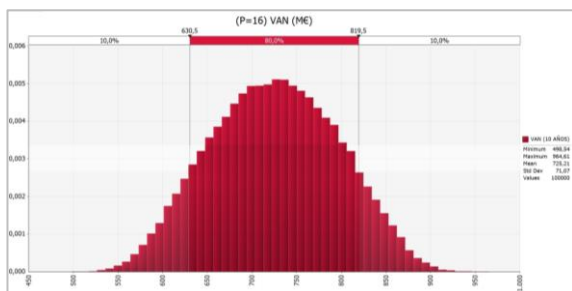
²⁹ El rango de valores utilizados para los valores de tiempo se basa en la Figura 13 según encuestas entre usuarios de Trambaix y Trambesós 2009.

³⁰ Se toma como valor más probable el obtenido en el modelo de reparto modal para cada escenario tarifario. Se estima que, de los viajes que dejan de hacerse en vehículo privado tras el peaje urbano, se derivan al transporte público entre un 50% y el 100%. El valor mínimo corresponde al estudio realizado en diciembre de 2019 por el RACC, que analiza el impacto de la zona de bajas emisiones de Barcelona sobre la demanda del transporte público.

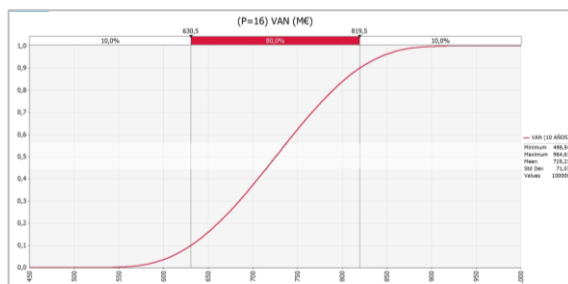
³¹ Representan los porcentajes de viajes transferidos al transporte público para cada situación de peaje según la estimación realizada por el modelo de reparto modal. Los porcentajes de 84%, 85% y 87% corresponden a los escenarios tarifario de 9 cts/km, 16 cts/km y 30 cts/km, respectivamente.

³² Se estima como valor más probable de inversión el calculado en el análisis de referencia con un rango que puede oscilar $\pm 20\%$.

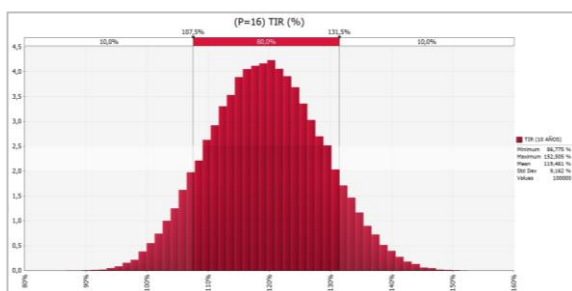
a) Histograma del VAN (m€)



b) Función de distribución acumulada VAN



c) Histograma del TIR (%)



d) Función de distribución acumulada TIR

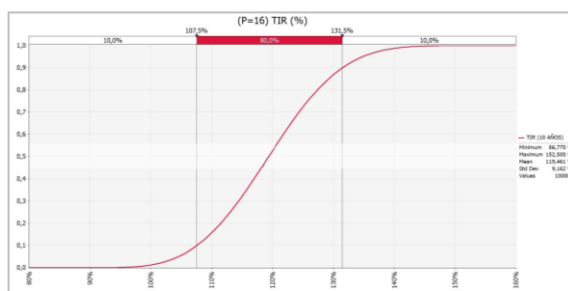


Figura 15. Histograma y función de distribución acumulada del VAN y TIR para una tarifa de peaje de 16 cts/km.

De los resultados obtenidos podemos decir que un esquema tarifario de 16 cts/km generaría, socioeconómicamente hablando, con una probabilidad del 80%, una TIR comprendida entre 107-131% con un VAN entre 630-819 m€. Esta elevada rentabilidad se consigue, principalmente, por los ahorros de tiempo generados por la menor congestión y fluidez circulatoria, unidos a los consiguientes efectos positivos sobre el medio ambiente de la ciudad y la previsible mejora de la salud de los ciudadanos motivada por el aumento de la actividad física en aquellos viajeros que optan por los modos de transporte más sostenibles.

10. Resultados del estudio financiero

Tras analizar la rentabilidad socioeconómica del proyecto se ha estudiado su rentabilidad desde el punto de vista financiero, para lo que se ha identificado y sistematizado la información de carácter monetario (inversión, ingresos y costes). Al igual que para el análisis socioeconómico, se parte de una serie de hipótesis como: considerar un incremento de la inversión del 5% para atender a posibles modificaciones del proyecto, suponer que el Ayuntamiento de Barcelona dispone de fondos propios para realizar la inversión, prever que la ejecución del proyecto se llevaría a cabo en 2 años con una planificación de ejecución del 60% el primer año y del 40% el segundo año, estimar un porcentaje de impagos para la tasa del 25%, considerar exentos de la tasa de peaje los autobuses, motocicletas, ciclomotores y vehículos

eléctricos, así como aplicar una tasa financiera de descuento de un 10%. Por último, en cuanto a los flujos de tráfico para el periodo de 10 años, se parte de la misma hipótesis que para el estudio socioeconómico. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 6. Cuenta de explotación del peaje urbano en Barcelona para una tarifa de 16 cts/km. Fuente: elaboración propia.

AÑO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversiones (m€)	59	39								
Ingresos (m€)			268	268	268	270	273	279	287	298
Gastos (m€)			130	130	130	131	132	135	139	144
RESULTADO BRUTO (m€)			138	138	138	140	141	144	148	154

Tabla 7. Rentabilidad a 10 años del proyecto de peaje urbano en Barcelona para un escenario tarifario de 16 cts/km.

T.I.R. PROYECTO (P=16 CTS/KM) T=10 AÑOS	72%
VAN (T=10 AÑOS). TASA DESCUENTO=10%	340 m€

A pesar, de que, a la vista de los resultados obtenidos, la inversión parece ser muy rentable, pueden existir riesgos para el cumplimiento de ciertos parámetros como el porcentaje de impagos, demanda de tráfico o las exenciones consideradas. Debido a ello, se han transformado estos valores en variables aleatorias a las cuales se les han asignado una función de densidad de probabilidad tipo Pert. A continuación, se adjunta una tabla resumen con los valores utilizados en el análisis de sensibilidad:

Tabla 8. Rango de valores de las variables aleatorias definidas.

Variables aleatorias	Valor probable	Valor mínimo	Valor máximo
Demanda del tráfico ³³ (*10 ⁶ vehxkm)	8,8	7,8	9,8
Demanda no exenta del peaje ³⁴ (%)	68	78	58
Impago de peaje ³⁵ (%)	25	15	35

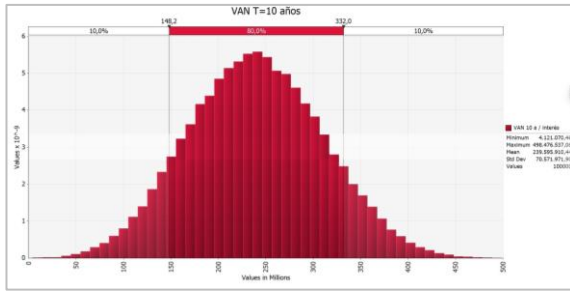
Al igual que para el estudio socioeconómico, para cada distribución de probabilidad se han realizado diferentes muestreos con los que se ha recalculado el estudio financiero, cada vez con un grupo diferentes de valores posibles realizando 100.000 iteraciones. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

³³ A partir del modelo de transporte hemos obtenido los resultados de la demanda de tráfico. No obstante, en el análisis de riesgo y para estar del lado de la seguridad desde el punto de vista financiero, se ha supuesto que dicha demanda se pueda llegar a reducir en un 20%. Se ha utilizado como valor más probable el del análisis de referencia.

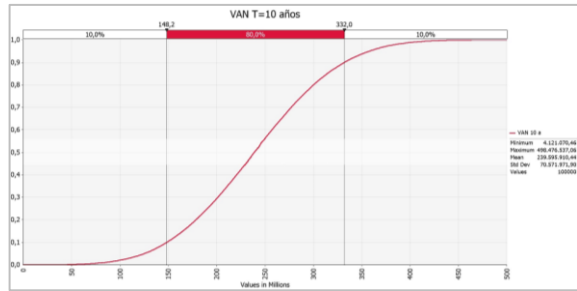
³⁴ Para el análisis del riesgo se contempla que, por posibles motivos de política municipal, las exenciones inicialmente consideradas puedan variar un 10% con respecto al escenario base. De esta forma utilizaremos como valor más probable el del análisis de referencia, es decir el 68% no exento, como valor mínimo el 78% no exento y como valor máximo el 58% no exento.

³⁵ Dado que estamos en un entorno urbano donde probablemente el proyecto sea gestionado por las haciendas locales se ha aumentado la cuota de impagos desde el 25% hasta un 35%. De esta forma se establece un rango de impagos que se movería entre el 15%-35%.

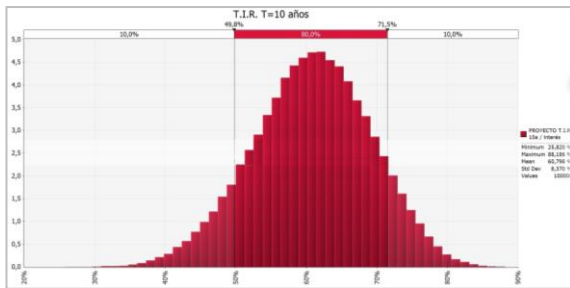
a) Histograma del VAN (m€)



b) Función de distribución acumulada VAN



c) Histograma del TIR (%)



d) Función de distribución acumulada TIR

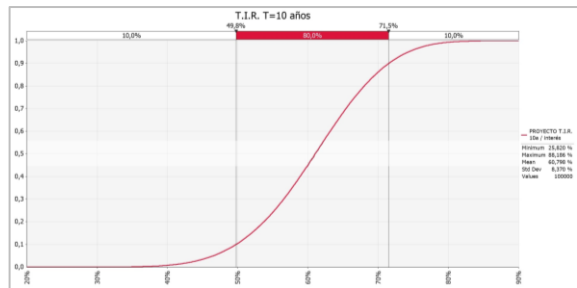


Figura 16. Histograma y función de distribución acumulada del VAN y TIR financiero a 10 años para una tarifa de peaje de 16 cts/km.

Podemos concluir que, para las hipótesis planteadas y después de simular las diferentes casuísticas que se nos pueden presentar, el riesgo de obtener resultados financieros negativos para un ciclo del proyecto de 10 años es prácticamente nulo, a pesar de la elevada exigencia de rentabilidad (10%). Atendiendo al gráfico anterior, tendríamos un 80% de probabilidad de que el VAN del proyecto se situase entre los 148 m€ y los 332 m€ con una TIR comprendida entre el 50% y el 71%. Por lo tanto, el proyecto es una gran fuente de ingresos para la administración pública³⁶, que debería dedicar estos fondos a la mejora del sistema de transporte colectivo, del espacio público (que debería tener una transformación substancial si se establecen las supermanzanas previstas en Barcelona) y, posiblemente, a compensar ciertas pérdidas de ingresos de fuentes relacionadas con la movilidad, como el aparcamiento en superficie.

³⁶ Aunque, para facilitar la discusión, se ha considerado el proyecto como una responsabilidad del Ayuntamiento de Barcelona, es evidente que el proyecto afecta claramente todo el ámbito metropolitano y también otras comarcas catalanas. La gobernanza del peaje urbano y, por tanto, de las distintas posibilidades de gestión y financiación del mismo, es un tema que merecería un estudio en profundidad.

11. Conclusiones

En Europa, a pesar de los avances tecnológicos y la presión política para mejorar la calidad ambiental, los niveles de polución en muchas zonas urbanas siguen siendo superiores a los recomendados por la Unión Europea y la OMS (European Environment Agency, 2019). Barcelona, en particular, sobrepasa con frecuencia los límites establecidos. La polución urbana tiene efectos nocivos tanto para la salud de las personas como para el entorno físico y es ocasionada principalmente por el tráfico rodado. Por este motivo, las autoridades de muchas ciudades que durante décadas habían desarrollado políticas favorables a la movilidad en automóvil, han constatado que llevaban a situaciones insostenibles debidas a la congestión y a unos impactos ambientales y sociales que reducen la calidad de vida de la población. Así pues, se han ido popularizando medidas regulatorias sobre la utilización del espacio público (zonas peatonales o con severas restricciones a los vehículos, carriles bus, etc.) y sobre el aparcamiento y, en algunos casos, sobre el acceso de determinados vehículos a zonas sensibles. Los resultados han sido, en muchos casos, positivos pero insuficientes para conseguir que las áreas urbanas alcancen los objetivos de convivencia y de calidad ambiental deseados y ha sido necesario emplear otros mecanismos, como el peaje urbano, que ha demostrado un gran potencial para contribuir a la movilidad sostenible en las ciudades.

La experiencia internacional muestra que, en general, los actuales peajes urbanos imponen tarifas que no dependen del uso de la infraestructura ni de la contaminación realmente generada por el vehículo y además no ofrecen alternativas gratuitas una vez se accede al área tarifada. El presente documento ha descrito sintéticamente un nuevo modelo de peaje urbano que no sólo es mucho más eficiente, sino que además actúa sobre la jerarquía viaria urbana, reestructurándola y ligándola a un servicio. Los últimos avances tecnológicos hacen posible la implementación de este nuevo modelo combinando la tecnología de navegación satelital con las comunicaciones móviles permitiendo aplicar tarifas en línea con los principios de la Unión Europea “el que usa y contamina paga”. La ciudad de Singapur ya trabaja en esta dirección y estudia una evolución tecnológica de su actual sistema de peaje urbano (Diao, 2018). El futuro despliegue de la red de comunicaciones 5G, podría permitir la total conexión del vehículo con su entorno lo que hace necesario que la tecnología aplicada al nuevo sistema sea lo suficientemente escalable para su adaptación futura. En cualquier caso, el rápido desarrollo de las telecomunicaciones hace que sea en el momento de su implementación cuando se deba concretar la tecnología más idónea para el nuevo sistema propuesto.

A partir de la información disponible, se han evaluado los efectos que tendría la implantación del nuevo modelo de peaje urbano en Barcelona. El impacto sobre la movilidad del vehículo privado que supondría la aplicación del nuevo peaje, indica que podría llegar a reducirse un 21% la demanda de tráfico (en veh-km) implantando una tarifa de 16 cts/km. Según los estudios de BCN Ecologia, esta reducción de la demanda de tráfico en Barcelona permitiría cumplir con los estándares mínimos de calidad del aire fijados por la Unión Europea. Para garantizar que los viajes expulsados de la red de peaje se transfieran a medios de transporte más sostenibles, la propuesta llevaría implícita una serie de actuaciones dirigidas a reducir la capacidad vial en la red secundaria y a recuperar espacio público en la ciudad (aceras, carriles bici,

etc.). En Barcelona, la implantación de las supermanzanas sería una fórmula evidente de actuación en este sentido.

Aparte de permitir cumplir con los límites de contaminación atmosférica, la implementación del nuevo modelo de peaje urbano en Barcelona generaría ingresos adicionales a la administración pública que podrían revertir en mejorar el sistema de transporte público de la ciudad y de esta forma aliviar los posibles efectos regresivos derivados de la medida.

12. Referencias

Agència de la Salut Pública. (2018). *Informe de qualitat de l'aire de Barcelona, 2018*.

Börjesson, M., Eliasson, J., & Hamilton, C. (2016). Why experience changes attitudes to congestion pricing: The case of Gothenburg. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 85, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.002>

Börjesson, M., Eliasson, J., Hugosson, M. B., & Brundell-Freij, K. (2012). The Stockholm congestion charges-5 years on. Effects, acceptability and lessons learnt. *Transport Policy*, 20, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.11.001>

Börjesson, M., & Kristoffersson, I. (2015). The Gothenburg congestion charge . Effects , design and politics, 75, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.03.011>

Bull, A. (2003). *Congestión del tránsito. El problema y como enfrentarlo*.

Carrasco Diaz, E. et al. (2012). La Tarificación Vial En El Marco De La Unión Europea. Situación Actual En España, 1–12.

Castiglione J., Bradley M., and G. J. (2014). *Activity-Based Travel Demand Models: A Primer. The Strategic Highway Research Program of the Transportation Research Board*.

Comisión Europea. (2001). *La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad*.

Croci, E. (2016). Urban road pricing : a comparative study on the experiences of London , Stockholm and Milan. *Transportation Research Procedia*, 14, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.062>

Diao, M. (2018). Towards sustainable urban transport in Singapore: Policy instruments and mobility trends. *Transport Policy*, (November 2016), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.05.005>

Echavarri, J. P. (2008). La experiencia internacional en peajes urbanos.

European Environment Agency. (2019). *Air quality in Europe — 2019 report*.

Goh, M. (2002). Congestion management and electronic road pricing in Singapore. *Journal of Transport Geography*, 10(1), 29–38. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(01\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(01)00036-9)

- Gyurkovich, M., Poklewski-koziell, D., & Duarte, C. M. (2019). Supermanzana in Practice . Ability to Create People Friendly Spaces upon the Example of Selected Barcelona-Based Projects
Supermanzana in Practice . Ability to Create People Friendly Spaces upon the Example of Selected Barcelona-Based Projects. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/9/092010>
- Kopp, P., & Prud'homme, R. (2008). Urban Tolls : Price and Congestion Some Lessons for a Better Urban Public, 1–31.
- Leape, J. (2006). The London Congestion Charge. *The Journal of Economic Perspectives*, 20, 157–176.
- May, A. D., & Milne, D. S. (2000). Effects of alternative road pricing systems on network performance. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 34(6), 407–436.
[https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(99\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(99)00015-4)
- Pons-Rigat, A.; Sauri, S.; Turro, M. (2017). Matching funding, mobility, and spatial equity objectives in a networkwide road pricing model: case of Catalonia, Spain. *Transportation Research Record*.
- Prud'homme, R., & Kopp, P. (2006). The Stockholm Toll, 1–38.
- Robuste, F. (2001). El peaje en autopistas como precio por un servicio y como garante de sostenibilidad.
- Robusté, F. (2002). El peaje en autopistas como precio por un servicio y como garante de sostenibilidad. *Revista de Obras Publicas*, 149(3425), 127–139.
- Rotaris, L., Danielis, R., Marcucci, E., & Massiani, J. (2010). The urban road pricing scheme to curb pollution in Milan, Italy: Description, impacts and preliminary cost-benefit analysis assessment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5), 359–375.
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.008>
- Rueda Palenzuela, S. (2011). EL URBANISMO ECOLÓGICO. [Http://Urban-e.Aq.Upm.Es](http://Urban-e.Aq.Upm.Es), 1–22.
- Santos, G. (2003). Double Cordon Tolls in Urban Areas to Increase Social Welfare, (02), 53–59.
- Santos, G. (2004). Urban Road Pricing in the U.K. *Research in Transportation Economics*, 9(04), 251–282. [https://doi.org/10.1016/S0739-8859\(04\)09011-0](https://doi.org/10.1016/S0739-8859(04)09011-0)
- Transport for London. (2004). *Congestion charging Central London Impacts monitoring Second Annual Report 2014*.
- Zabic, M. (2011). *GNSS-based Road Charging Systems Assessment of Vehicle Location Determination*.