



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Análisis de colas en autopistas de cuota en México

Jorge Artemio Acha Daza
María Aurora Moreno Martínez
Jorge Jerónimo Martínez Antonio

Publicación Técnica No. 609
Sanfandila, Qro.
2020

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Transporte Integrado y Logística del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Jorge Artemio Acha Daza, la Mtra. María Aurora Moreno Martínez y el Mtro. Jorge Jerónimo Martínez Antonio

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación TI-12/19 “Análisis de colas en autopistas de cuota en México”.

Se agradece los comentarios del Dr. Carlos Daniel Martner Peyrelongue, coordinador de Transporte Integrado y Logística del Instituto Mexicano del Transporte.

Contenido

	Página
Índice de figuras	vii
Índice de cuadros	ix
Sinopsis	xii
Abstract	xiv
Resumen Ejecutivo	xvi
Introducción	1
Antecedentes	1
Alcances	2
Objetivos del estudio	2
Metodología	3
Estructura del reporte	3
Capítulo 1. Descripción de un sistema de pago de peajes en una autopista	5
1.1 Introducción	5
1.2 Sistema de cobro convencional de peajes	5
1.3 Autopistas de peaje abierto y autopistas de peaje cerrado	6
1.4 Sistemas de peaje electrónico	7
1.5 Llegadas a la plaza de cuota	7
1.6 Número de casetas de cobro en una plaza	8
1.7 Modelo de colas	9

	Página
1.8 Enfoque de simulación	10
1.9 VISSIM	11
1.10 Conclusiones	11
Capítulo 2. Modelo de microsimulación	13
2.1 Introducción	13
2.2 El modelo de tráfico	13
2.2.1 Modelo de seguimiento del vehículo	14
2.3 Elementos de entrada al modelo	16
2.4 Conclusiones	18
Capítulo 3. Ejemplo de aplicación	19
3.1 Definición de la red de estudio	19
3.2 Geometría de la plaza de cobro de Palmillas	21
3.3 Datos de la demanda	25
3.4 Tiempos de atención de las casetas de cobro	27
3.5 Tipos de vehículos	28
3.6 Escenarios de las simulaciones	28
3.7 Calibración y validación	29
3.8 Resultados y comparación de los escenarios	30
3.8.1 Tiempos de demora	31
3.8.2 Longitud promedio de la cola	34
3.8.3 Tasa de ocupación de las casetas de cobro	38
3.8.4 Total de vehículos en la simulación	40
3.9 Conclusiones	42

	Página
Conclusiones	45
Bibliografía	47
Anexos	51

Índice de figuras

	Página
Figura 2.1 Simulación del Tránsito con Vissim.	14
Figura 3.1 Plaza de cobro de Palmillas	20
Figura 3.2 Red de estudio en Vissim	21
Figura 3.3 Configuración de las casetas de cobro de la plaza de cobro de Palmillas	22
Figura 3.4 Configuración de las casetas de cobro de la plaza de cobro de Palmillas en Vissim	23
Figura 3.5 Plaza de cobro en Vissim	24
Figura 3.6 Estaciones de aforo cercanas a la plaza de cobro de Palmillas	25
Figura 3.7 Modelo de vehículo predeterminado de Vissim	28
Figura 3.8 Tiempo Promedio Demora en cola Casetas sentido a Ciudad de México (Minutos)	32
Figura 3.9 Tiempo Promedio Demora en cola Casetas sentido a Querétaro (Minutos)	33
Figura 3.10 Longitud de cola de casetas en sentido a Ciudad de México	35
Figura 3.11 Longitud máxima de cola de casetas en sentido a Ciudad de México en escenario 1	36
Figura 3.12 Longitud de cola de casetas en sentido a Querétaro	37
Figura 3.13 Longitud de cola en el escenario 5	38
Figura 3.14 Porcentaje de ocupación de Casetas en sentido a Ciudad de México	39
Figura 3.15 Porcentaje de ocupación de Casetas en sentido a Querétaro	40

Figura 3.16	Número de vehículos con sentido a Ciudad de México	41
Figura 3.17	Número de vehículos con sentido a Querétaro	42

Índice de cuadros

	Página
Cuadro 1.1 Comparación de Casetas y Capacidades	8
Cuadro 1.2 Número necesario de casetas por carril de circulación para evitar retrasos	9
Cuadro 1.3 Notación de un sistema de colas	10
Cuadro 2.1 Elementos básicos de un modelo en Vissim	17
Cuadro 3.1 Distribución de la demanda para la hora de proyecto	26
Cuadro 3.2 Distribución de la demanda para la hora de proyecto	27
Cuadro 3.3 Escenarios de simulación	29
Cuadro 3.4 Datos de validación	30
Cuadro 3.5 Tiempo total de demoras del total de vehículos (Horas)	34

Sinopsis

Todo usuario de una autopista de peaje espera recibir un mejor servicio que el que obtendría al circular por una carretera libre de peaje. Mayor seguridad, un mejor estado de la superficie de rodamiento, menores costos de operación, pero sobre todo un menor tiempo de viaje. Sin embargo, la operación del pago de la cuota en una caseta de cobro puede significarle retrasos por el tiempo necesario para ello. Esta situación es común en tiempos de alta demanda como fines de semana o periodos vacacionales.

Tecnologías como el cobro electrónico de cuotas, permiten que el pago de los peajes sea más ágil, y su uso extensivo puede significar ahorros. Además, permite ahorros para el operador de la autopista en derecho de vía, construcción de casetas y operación de las mismas.

Este proyecto estudia el efecto en ahorro de tiempo que generaría el uso por un mayor número de usuarios de un sistema de cobro electrónico contra un medio de pago tradicional usando dinero en efectivo. El análisis utiliza información de la plaza de cobro de Palmillas en la autopista México-Querétaro, mostrando como, con una inversión relativamente baja, se pueden lograr importantes ahorros de tiempo para los usuarios de la autopista.

Abstract

Every user of a toll road expects to receive better service than they would get from driving on a toll-free road. Greater security, a better condition of the pavement surface, lower operating costs, but above all a shorter travel time, are some of the benefits (s)he would expect to obtain by paying a fee. However, the user does not always get what (s)he expects. In particular, the payment of the fee in a toll booth may mean delays for the time necessary to make that payment. This situation is commonly seen in times of high demand; such as weekends or vacation periods.

There are already technologies, such as the electronic collection of fees, which make the payment of tolls for driving on a motorway more agile, and its extensive use can mean very significant savings for all users of a toll road, in addition to allow savings for the highway operator in right-of-way, construction of houses and their operation.

This project studies the time saving effect that the use by a greater number of users of an electronic collection system would generate against a traditional means of payment using cash. The analysis uses information from the Palmillas toll plaza on the Mexico-Querétaro highway, showing how, with a relatively low investment, significant time savings can be achieved for highway users.

Resumen ejecutivo

El principal objetivo del estudio que aquí se presenta, es analizar el comportamiento de las líneas de espera para el pago en las casetas de cuota de las autopistas de peaje en México. En particular, se describe el caso de la plaza de cobro de Palmillas en la autopista México-Querétaro.

El número de operaciones de cobro en las 1,192 plazas de cobro instaladas en las autopistas de peaje en México es significativamente alto. CAPUFE reportó que durante el periodo enero-octubre de 2018 este número alcanzó casi los 328 millones de operaciones, por lo que, pequeñas reducciones en el tiempo necesario para el pago de las cuotas, significarían grandes ahorros para los conductores en los tiempos de recorrido.

Los congestionamientos en las plazas de cobro, sobre todo en épocas de gran demanda, son uno de los principales problemas que los usuarios de las carreteras o puentes de cuota sufren, provocando inconformidades por las demoras ocasionadas.

Para el cobro de las cuotas en las casetas de las autopistas de peaje se utilizan distintos medios de pago, desde el tradicional pago en efectivo hasta el uso de tarjetas electrónicas tipo IAVE, además de aceptar pagos con tarjetas de crédito en algunos casos. Otros operadores solo aceptan el pago en efectivo y algunos otros con tarjetas electrónicas conocidas como tags.

El tiempo necesario para el pago puede ir desde 14 segundos en promedio por vehículo en un sistema tradicional hasta solo 3 segundos en un sistema de cobro electrónico con barrera.

Para mejorar los niveles de servicio en el pago de peajes, se propuso llevar a cabo un análisis del comportamiento de las líneas de espera en las casetas de cuota, y en particular de los diferentes medios de pago de peajes, a fin de identificar aspectos que permitan lograr una reducción en los tiempos de servicio a los usuarios.

Las líneas de espera para el pago de cuotas en una autopista pueden verse como un conjunto de colas de igual número de casetas de peaje.

En la construcción de un modelo de colas se supone lo siguiente:

El flujo del tráfico no presenta fluctuaciones bruscas, es decir, permanece constante en el corto plazo.

El tiempo entre las llegadas consecutivas de dos vehículos que entran al área de la plaza de cobro está distribuido exponencialmente.

La llegada de los vehículos a las casetas de cobro es ordenada y uniforme.

Los conductores deben esperar a que todos los vehículos adelante en la fila concluyan su operación del pago del peaje, causándoles un retraso y éste está distribuido exponencialmente.

La teoría de colas se utiliza para modelar el proceso de servicio cuando los clientes esperan en una fila para ser atendidos. Las características principales que describen el sistema de colas son: el patrón de llegada de los clientes, el patrón de servicio de los servidores, el número de servidores, la capacidad del sistema y la disciplina de servicio a los clientes.

Si bien el enfoque teórico del análisis de colas es un camino a utilizar para el análisis de la operación de una plaza de peaje, se ha visto que no refleja fielmente las condiciones de operación de una plaza de cobro. Es por lo anterior que en los últimos años se ha preferido utilizar un enfoque de simulación para analizar la operación de las plazas de cobro. De los múltiples programas de simulación en el mercado, en esta investigación se decidió utilizar el programa Vissim.

Los modelos de microsimulación proporcionan un mayor entendimiento de las operaciones en una plaza de cobro (Ceballos y Curtis, 2004). En la modelación de las casetas de peaje se integran aspectos como la configuración de las casetas, la composición vehicular, el comportamiento del conductor, la elección del carril para la caseta de peaje; al modelar estos y más factores se tiene una herramienta de gran utilidad para los organismos y/o entidades de transporte encargados del diseño y modernización de las casetas de peaje (Mckinnon et al, 2014).

Para la construcción del modelo de microsimulación de este trabajo, se utilizó el software de simulación microscópica denominado Vissim. Desarrollado por la empresa PTV (Planung Transport Verkehr AG), este software se basa en el modelo psico-físico del comportamiento del conductor elaborado por Widemann en 1974 (Casares, 2015).

El software Vissim, como se mencionó anteriormente, se basa en un modelo de flujo de tráfico y un modelo de control de señales. El primero se sustenta en dos modelos, uno de seguimiento del vehículo y otro de cambio de carril. El modelo de control de señales se compone de un conjunto de programas para el control de las unidades lógicas del control del tráfico.

La estructura para crear el modelo en el software Vissim, se puede integrar en tres módulos. En el primero, está lo relacionado a la oferta vial, es decir, a la infraestructura del modelo; un segundo abarca lo relacionado a la demanda vial, como el tránsito vehicular y finalmente un módulo que corresponde a los elementos de control del sistema. Una vez integrados los tres anteriores, se obtienen todas las medidas de desempeño del sistema y una simulación en tercera dimensión.

Para este trabajo, en un inicio se consideran los siguientes elementos:

- Imagen de fondo (background) sobre la cual se va a cargar la red en estudio.
- Creación de los links y conectores, para el diseño de la red vial.
- Trazo de las rutas de decisión.
- Establecimiento de las reglas de prioridad en las zonas de conflicto de las intersecciones, incorporaciones o desincorporaciones.
- Definición de las áreas donde se presentan velocidades más bajas, colocando reductores de velocidad.
- Clasificación vehicular.
- Restricciones de circulación para los vehículos seleccionados.
- Programación de reglas de decisión en grupos de señales.
- Volúmenes de tráfico vehicular en los extremos de la red de volúmenes direccionales.
- Tiempos de atención en las casetas de cobro; en Vissim se pueden introducir valores constantes, distribuciones empíricas o teóricas.
- Configuración de los elementos para calibrar el modelo.

Con el modelo de microsimulación se esperaba determinar el tiempo total que tomaría el cobro de peajes a los vehículos, encontrando así el tiempo de retraso que sufrirían los conductores en una plaza de cobro. Para el ejemplo de aplicación, se seleccionó la plaza de cobro de Palmillas.

La plaza de cobro de Palmillas se encuentra ubicada en el Km 147+917 de la Autopista México-Querétaro. Cuenta con 22 casetas de cobro, ubicándose en el extremo derecho de cada sentido de circulación las casetas exclusivas para cobro electrónico. Es una de las dos principales plazas de cobro de esa autopista.

Se consideraron las siguientes combinaciones de pagos manuales y pagos con cobro electrónico:

- En el caso base, se supone que el pago en todos los casos se efectúa de manera manual.
- En el segundo caso, se supone que el 75% de los pagos es manual y el 25% con cobro electrónico.
- En el tercer caso, se supone que la mitad de los pagos es manual y la otra mitad es con cobro electrónico.
- En el cuarto caso, se supone que 25% de los pagos es manual y 75% es con cobro electrónico.
- En el quinto caso, se supone que todos los pagos son con cobro electrónico.

Se simuló un total de 7,200 segundos, dentro de los cuales, los primeros 3,600 fueron parte del precalentamiento o prellenado de la red; este intervalo no se consideró para los resultados obtenidos. El análisis se realizó para el intervalo de 3,600-7,200, intervalo que se utiliza para evaluar el modelo. Se realizaron 15 réplicas para cada escenario.

Se consideran como medidas de desempeño de la plaza de cobro: los tiempos de demora en cola, la longitud de cola, tasa de ocupación de las casetas y los vehículos totales simulados.

Se observan en forma general, mejoras notables en las medidas de desempeño, cuando se reduce la demanda con pago manual o en efectivo. También se observa que contar con casetas exclusivas a un tipo de pago, reduce el valor de las medidas de desempeño y se desaprovecha el uso del suelo.

Del desarrollo de este trabajo se pueden establecer las siguientes conclusiones:

El enfoque de simulación es mejor para representar las operaciones de una plaza de cobro ya que toma en cuenta aspectos que un análisis de colas ignora.

El uso de un modelo de simulación, como el usado en el proyecto, al analizar un problema de transporte resulta menos costoso ya que no afecta las operaciones del sistema bajo estudio.

En periodos de alta demanda, los vehículos que hacen cola para pagar en efectivo provocan retrasos que afectan tanto a los conductores que pagan efectivo como a aquellos que cuentan con dispositivos para el pago electrónico de las cuotas.

La configuración actual, con los carriles exclusivos para el pago electrónico de peajes situados a la derecha, no aprovecha totalmente la ventaja del pago electrónico.

El uso del pago electrónico de peajes aumenta la capacidad de la plaza, reduce los retrasos y la contaminación provocada por la disminución de la velocidad de los vehículos que circulan por las plazas de peaje.

Al aumentar la capacidad de las plazas de cobro puede reducirse el número de casetas de cobro y con ello los costos asociados a la construcción, derecho de vía, mantenimiento y el personal necesario para operarlas.

Una inversión relativamente baja en la implantación de un sistema de cobro electrónico de peajes puede dar lugar a una mejora sustantiva en el tiempo de servicio a los usuarios de las plazas de cobro de las autopistas de cuota. A mayor participación del peaje electrónico, menor es el tiempo perdido por los vehículos que transitan por la autopista.

Introducción

Antecedentes

Aun cuando, de acuerdo a cifras del Instituto Mexicano del Transporte (IMT-SCT-INEGI, 2018), en México de los 171,347 km de carreteras pavimentadas, solo 10,557 km corresponden a carreteras de cuota, siendo un porcentaje de poco más del 6 por ciento, el número de operaciones de cobro de cuotas en las 1,192 plazas de cobro instaladas es significativamente alto y ha experimentado un constante crecimiento en los últimos años. CAPUFE (2018) reporta que, en las casetas operadas por este organismo, durante el periodo enero-octubre de 2018, este número alcanzó casi los 328 millones de operaciones, cifra que muestra que aún pequeñas reducciones en el tiempo necesario para el pago de las cuotas podrían significar ahorros importantes para el conjunto de usuarios de las carreteras o puentes de peaje.

Por otro lado, los congestionamientos en las plazas de cobro son uno de los principales problemas que los usuarios de carreteras de cuota enfrentan en sus recorridos y que provocan inconformidades por los retrasos. Este problema se ve agravado al término de los fines de semana y períodos vacacionales, siendo frecuente observar largas filas en las plazas de cobro aun cuando todas las casetas estén abiertas.

Para el cobro de las cuotas en las casetas de las autopistas de peaje se utilizan distintos medios de pago, que van, en el caso de CAPUFE desde el tradicional pago en efectivo en casetas atendidas por personal hasta el uso de tarjetas electrónicas tipo IAVE en casetas automatizadas, pasando por aceptar pagos con tarjeta de crédito. Otros operadores solo aceptan el pago en efectivo y otros más solo el pago con tarjetas electrónicas conocidas como tags.

Cada uno de los medios de pago requiere un tiempo de servicio diferente para el cobro; por ejemplo, en Japón, el sistema tradicional de cobro de cuotas tomaba, en promedio, 14 segundos por vehículo. Mientras que el sistema de cobro electrónico de cuotas tomaba sólo 3 segundos por vehículo. (Highway Industry Development Organization, 1997).

La Dirección General de Desarrollo Carretero de la Subsecretaría de Infraestructura de la SCT pretende mejorar los niveles de servicio en el pago de peajes en las autopistas de cuota de México, de forma tal que se reduzca el tiempo empleado para hacer esos pagos. Esto agilizaría el flujo en las plazas de cobro, reduciendo los congestionamientos y retrasos a los usuarios de esas autopistas.

Como consecuencia de lo anterior, se propuso llevar a cabo un análisis del comportamiento de las líneas de espera en las casetas de cobro de las autopistas de cuota en México, y en particular de los diferentes medios de pago de peajes, con el fin de identificar aquellos aspectos en los que podría modificarse su operación para lograr una reducción en los tiempos de servicio a los usuarios y, por tanto, una operación más eficiente en las plazas de cobro.

Este proyecto se alinea con la Estrategia 4.9.1 del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018: modernizar, ampliar y conservar la infraestructura de los diferentes modos de transporte, así como mejorar su conectividad bajo criterios estratégicos y de eficiencia.

En relación con el Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2013-2018, el trabajo está alineado con los siguientes objetivos sectoriales: 1) Desarrollar una infraestructura de transporte y logística multimodal que genere costos competitivos, mejore la seguridad e impulse el desarrollo económico y social. 2) Contar con servicios logísticos de transporte oportunos, eficientes y seguros que incrementen la competitividad y productividad de las actividades económicas. 3) Generar condiciones para una movilidad de personas integral, ágil, segura, sustentable e incluyente, que incremente la calidad de vida, y 6) Desarrollar integralmente y a largo plazo al sector con la creación y adaptación de tecnología y la generación de capacidades nacionales.

Alcances

Para lograr el objetivo principal de este estudio, además de una revisión de los aspectos teóricos del problema en fuentes documentales, fue necesario contar con información acerca del comportamiento, tanto por el lado de la demanda en cuanto a las tasas de llegada de los diferentes tipos de vehículos a las plazas de cobro, como de la oferta en cuanto a los tiempos de servicio para cada uno de los tipos de usuario y medios de pago.

Objetivos del estudio

El objetivo principal del estudio aquí propuesto fue analizar el comportamiento de las líneas de espera en las casetas de cuota de las autopistas de peaje en México. En particular se hizo un análisis de caso para la plaza de cobro de Palmillas en la autopista México-Querétaro.

Metodología

La metodología utilizada comprendió la revisión y el análisis de las fuentes de información documental sobre el comportamiento de las líneas de espera en las casetas de peaje. A partir de ese análisis, se identificó la información que sería de utilidad. También se recabó información para determinar las tasas de llegada y de servicio para cada tipo de usuario y medio de pago en una plaza de cobro. Una vez que se contó con esa información, se llevaron a cabo simulaciones con la ayuda del programa Vissim, para determinar el efecto de distintos escenarios en cuanto a los medios de pago en las casetas de peaje.

Estructura del reporte

Este reporte está organizado de la siguiente forma:

Este primer apartado presenta la introducción al estudio. Se justifica, de manera general, la necesidad de llevar a cabo el análisis de las líneas de espera en las casetas de peaje en México. En este mismo capítulo, se describen el alcance, los objetivos y la metodología del proyecto.

El primer capítulo describe los elementos que forman parte de un sistema de cobro de peajes.

En el segundo capítulo describen los aspectos teóricos para analizar el efecto de distintos escenarios en cuanto a los medios de pago en las casetas de peaje y encontrar el tiempo de retraso que sufrirían los conductores en la plaza de cobro de Palmillas.

En el tercer capítulo se presenta el desarrollo y los resultados de un ejercicio de aplicación realizado en la plaza de cobro de Palmillas de la autopista México-Querétaro

En un último apartado se presentan las conclusiones de este trabajo.

1. Descripción de un sistema de pago de peajes en una autopista de cuota

En este capítulo se describen diferentes sistemas de pago de peajes en una autopista de cuota.

1.1 Introducción

Para el cobro de peajes en una autopista de cuota existen métodos que van desde un sistema convencional de pago en efectivo hasta sistemas de peaje electrónico. Cada uno presenta sus propias características y diferencias en el tiempo necesario para efectuar el cobro del peaje

1.2 Sistema de cobro convencional de peajes Introducción

Acha Daza (2014) señala que: un sistema convencional de pago de peajes en una autopista de cuota es normalmente manual e implica la necesidad de que el vehículo se detenga para poder efectuar el pago. Se requiere que el conductor baje la ventanilla de su auto y entregue su pago al operador de la caseta. Si el pago se hace efectivo, el operador verifica que la cantidad sea el importe correcto de la cuota. En caso de recibir un importe mayor, entregará el cambio respectivo al conductor junto con el comprobante de pago que identifica plaza de cuota, la caseta, la hora y fecha del cruce y el monto de la cuota. Cuando el pago se hace con tarjeta de crédito, el operador pasa la tarjeta por una terminal en la que se verifica que la tarjeta sea válida. Si la tarjeta es válida, se hace el cargo a la cuenta asociada y se emite el comprobante respectivo, el cual el operador entrega al conductor. Cuando el operador de la caseta tiene la certeza de que el pago ha sido efectuado correctamente, abre la barrera localizada al final de la caseta y una vez concluida la operación de pago el vehículo puede proseguir su viaje.

Otro tipo de casetas permiten el pago con monedas o fichas, las que se arrojan a una canastilla y una vez que se ha depositado el importe correcto, se levanta la barrera permitiendo el paso del vehículo.

También existen sistemas de cobro en los que se emite una tarjeta cuando el vehículo entra a la autopista. En esta tarjeta se señala el punto de entrada. El cobro se realiza en una caseta de salida, de acuerdo a los kilómetros recorridos entre el punto de entrada y el de salida.

Los sistemas de cobro convencional requieren de un uso intensivo del suelo ya que es necesario construir las plazas de cobro e instalar las casetas necesarias. Además, se necesita contar con personal encargado de operar las casetas de cuota. También, para efectos de auditoría se instalan los llamados controladores de carril y equipos de videovigilancia.

1.3 Autopistas de peaje abierto y autopistas de peaje cerrado

Acha Daza (2014) menciona también que, en función del modo en que se controla el acceso a una autopista y el cobro por su uso se distinguen dos tipos de autopista: de peaje abierto y de peaje cerrado.

En el peaje abierto se paga conforme se va recorriendo la autopista en casetas de peaje colocadas cada cierta distancia. A lo largo de la autopista existen puntos de entrada y salida, pero éstos no necesariamente están equipados con casetas. En las plazas de cobro del peaje abierto no es necesario ningún tipo de identificación del origen del vehículo. A cada vehículo se le cobra, según cruce por cada plaza de cobro, la tarifa establecida de acuerdo con su categoría. Por ser más simple de operar, el sistema de peaje convencional abierto fue el primero utilizado y es el actualmente predominante en México.

Por otro lado, el peaje cerrado se caracteriza por contar con los siguientes elementos:

- Casetas de entrada, en las que se registra el acceso a la autopista con una tarjeta de entrada, señalándose el nombre de la caseta de entrada. Puede indicarse también, aún cuando no es indispensable, la hora de entrada a la autopista. Para facilidad y rapidez en el cobro, puede establecerse un código de colores para distinguir cada caseta de entrada.
- Casetas de salida, en las que se paga el importe correspondiente al tramo de la autopista recorrido, en función del punto que ha quedado registrado a la entrada.

En una autopista cerrada, el usuario solo hace paradas al entrar en el tramo de peaje (en las casetas de entrada para recibir su tarjeta) y a la salida (para efectuar el pago), sin necesidad de paradas intermedias, con el consiguiente ahorro de tiempo de viaje. A cada vehículo se le cobra teniendo en cuenta el punto de acceso y el punto de salida de la autopista, es decir, por el tramo recorrido y la clase a la que pertenece.

1.4 Sistemas de peaje electrónico

De acuerdo con Acha Daza (2008), la forma que se ha utilizado comúnmente en México el cobro electrónico de peajes, en la que se sigue contando con barreras en las plazas de cuota y la cual es del interés de este proyecto, se busca identificar de manera única a los automóviles cuando pasan por un sensor para de esa manera hacer el cargo correspondiente a la cuenta asociada al vehículo, logrando automatizar el cobro y los procesos de pago sin necesidad de detenerse totalmente en la caseta de cobro y eliminando la necesidad de contar con efectivo para cubrir el monto de la tarifa o la necesidad de personal que atienda la caseta.

Un sistema básico de cobro electrónico tiene tres elementos funcionales: un sistema automático de identificación de vehículos; un sistema de clasificación de vehículos; y un sistema de apoyo de video, formando el llamado controlador de línea. También se utilizan equipos de cómputo para transmitir, procesar, analizar y guardar la información de las distintas transacciones de cobro de peajes. En la publicación citada (Acha Daza, 2008) puede verse una descripción detallada de cada uno de los elementos funcionales mencionados.

Otro tipo de sistemas de cobro electrónico han logrado eliminar totalmente la necesidad de contar con plazas de cobro, con la ventaja de poder operar a flujo libre, pero requieren que todos los vehículos cuenten con etiquetas electrónicas y que el padrón vehicular sea altamente confiable y que esté actualizado.

1.5 Llegadas a la plaza de cuota

Puede considerarse que el flujo en una autopista es generalmente libre a ambos lados de la plaza de peaje. La capacidad de la autopista está dada por el número de vehículos que pueden circular en un punto por unidad de tiempo. La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2017) considera que la capacidad para autopistas en condiciones ideales es de 2,000 vph por carril cuando la velocidad de proyecto es mayor o igual a 90 km/h (terreno plano y lomerío). Puede considerarse que el nivel de flujo es relativamente constante y que, visto desde un punto de vista estocástico, el tiempo entre llegadas a la plaza de cobro sigue una distribución exponencial.

A medida que los vehículos se acercan a la plaza de peaje desde una dirección dada, el número de carriles se va ampliando y cada uno de éstos lleva a una caseta de cobro. El señalamiento vertical y horizontal indica a los conductores que deberán reducir su velocidad hasta detenerse, ya sea al final de la fila de espera de una caseta de peaje o junto a ésta. Regularmente, el espacio es suficiente para contener a todos los vehículos que están esperando para pagar la cuota. Las líneas de espera pueden verse como un conjunto de colas de igual número de casetas de peaje. También puede suponerse que el tiempo que transcurre para que un vehículo pase entre el área de espera y detenerse al final de una línea de peaje es constante, independientemente de la longitud de las líneas o la caseta en particular elegida.

1.6 Número de casetas de cobro en una plaza

En el Cuadro 1.1 se muestra la capacidad de una caseta de cobro de acuerdo al medio de pago.

Cuadro 1.1. Comparación de Casetas y Capacidades

Clase de caseta	Capacidad en veh/hr
Atendida (cambio, emisión de recibos, etc.)	350
Atendida (Sólo con distribución de boletos)	500
Automática (Sólo monedas – no fichas)	500
Automática (Básicamente fichas – pocas monedas)	650
Modo Mixto (Una de las clases anteriores y cobro electrónico.)	700
Dedicada al Cobro Electrónico (plaza de cobro)	1,200
Cobro Electrónico Express	1,800 a 2,000

Nota. En el caso del Cobro Electrónico Express, no hay casetas, por lo que la capacidad es la capacidad del tramo de carretera.

Fuente: Humphrey et al, 1992.

Siendo el objetivo de los conductores al utilizar una carretera el minimizar su tiempo de viaje, el operador de una autopista de peaje idealmente desearía no causar retrasos a los vehículos por el pago de las cuotas. Para lograr lo anterior, el número de casetas necesario por cada carril de circulación y forma de pago sería el señalado en el Cuadro 1.2.

Cuadro 1.2. Número necesario de casetas por carril de circulación de la autopista de peaje para evitar retrasos

Clase de caseta	Número de casetas
Atendida (cambio, emisión de recibos, etc.)	6
Atendida (Sólo con distribución de boletos)	4
Automática (Sólo monedas – no fichas)	4
Automática (Básicamente fichas – pocas monedas)	3
Modo Mixto (Una de las clases anteriores y cobro electrónico.)	3
Dedicada al Cobro Electrónico (plaza de cobro)	2

Fuente: Elaboración propia con información de Humphrey et al, 1992.

De los valores del Cuadro 1.2, puede verse que el número de casetas de cobro necesario para evitar retrasos es particularmente alto en el caso de una caseta atendida, como son la mayoría de las utilizadas en México. Contar con ese número de casetas significaría un alto costo para los operadores de las autopistas de peaje de nuestro país, particularmente en los periodos de alta demanda. Es por tanto recomendable buscar, en el corto plazo, una mayor participación del pago mediante el peaje electrónico e idealmente lograr que todo pago de cuotas se haga en carriles de tipo express. Esto último ya ocurre en las autopistas urbanas del Valle de México, en donde las barreras se utilizan solo en los accesos para verificar que las cuentas de los usuarios tengan suficiente saldo para cubrir el peaje máximo a cobrar por el uso de la autopista. En caso de no contar con el saldo suficiente, las barreras permanecen abajo y los vehículos son desviados a vialidades libres de peaje. El cobro del peaje ocurre sin que los conductores tengan que detener sus vehículos en las salidas que decidan usar.

1.7 Modelo de Colas

En la construcción de un modelo de colas se supone lo siguiente:

- El flujo del tráfico no presenta fluctuaciones bruscas, es decir permanece constante en el corto plazo.
- El tiempo entre las llegadas consecutivas de dos vehículos que entran al área de la plaza de cobro está distribuido exponencialmente.
- La llegada de los vehículos a las casetas de cobro es ordenada y uniforme.

- Los conductores deben esperar a que todos los vehículos adelante en la fila concluyan su operación del pago del peaje, causándoles un retraso y éste está distribuido exponencialmente.

La teoría de colas se utiliza para modelar el proceso de servicio cuando los clientes esperan en una fila para ser atendidos. Las características principales que describen el sistema de colas son: el patrón de llegada de los clientes, el patrón de servicio de los servidores, el número de servidores, la capacidad del sistema y la disciplina de servicio a los clientes. La notación utilizada para describir la configuración de un sistema de colas es $A/B/X/Y/Z$ donde el significado es el indicado en el Cuadro 1.3.

La capacidad del sistema Y y la disciplina de servicio Z pueden omitirse cuando la capacidad se considera infinita y la disciplina de servicio es “Primero en llegar, primero en salir”.

Cuadro 1.3. Notación de un sistema de colas

Características	Símbolo	Descripción
Patrón de llegada (A)	M	Distribución Exponencial
Patrón de servicio (B)	M	Distribución Exponencial
	G	Distribución General
Número de servidores (X)	1,2,...,∞	
Capacidad del sistema (Y)	1,2,...,∞	
Disciplina de servicio (Z)	PEPS	Primero en llegar, primero en salir

Fuente: Elaboración propia.

Considerando los supuestos citados arriba, los vehículos que llegan a la plaza de peaje serán distribuidos ordenadamente a las filas de espera de cada una de las casetas abiertas y cada una de las casetas recibirá un flujo con llegadas entre vehículos que tienen una distribución exponencial. De la misma forma, el tiempo de servicio es también exponencial. De esa forma, cada caseta puede verse como una cola independiente $M/M/1$.

1.8 Enfoque de simulación

Si bien el enfoque teórico del análisis de colas es un camino a utilizar para el análisis de la operación de una plaza de peaje, se ha visto que no refleja fielmente las condiciones de operación de una plaza de cobro. Es por lo anterior que en los últimos años se ha preferido utilizar un enfoque de simulación para analizar la operación de las plazas de cobro. Una ventaja adicional de un modelo de simulación al analizar un problema de transporte es que resulta menos costoso ya que no

afecta las operaciones del sistema bajo estudio (Nezamuddin, 2006; Abdelwahab, 2016) y el análisis puede llevarse a cabo en gabinete. De los múltiples programas de simulación en el mercado, en esta investigación se decidió utilizar el programa Vissim, el cual se describe en la siguiente sección.

1.9 Vissim

Una vez descrito las características del enfoque de simulación a utilizar, en el siguiente capítulo se muestran los resultados de un ejemplo de aplicación desarrollado con el programa Vissim mediante simulaciones para determinar el efecto de distintos escenarios en cuanto a los medios de pago en las casetas de peaje.

1.10 Conclusiones

En este capítulo se han descrito los diferentes sistemas de cobro de peajes en una autopista de cuota. También se ha señalado la diferencia entre las autopistas llamadas abiertas y las cerradas. Se describe el proceso de llegada de los vehículos a una plaza de cobro. Se presenta el análisis para determinar el número de casetas necesarias por carril de circulación en una autopista a fin de evitar retrasos. Se describe cómo se llevaría cabo el análisis de colas desde un enfoque teórico. También, se señala que un enfoque de simulación es más adecuado, describiendo el programa Vissim, seleccionado para este proyecto.

2. Modelo de microsimulación

En este capítulo se describen los aspectos teóricos para analizar el efecto de distintos escenarios de los medios de pago en las casetas de peaje, y encontrar el tiempo de retraso que sufrirían los conductores en la plaza de cobro de Palmillas. Para llevar a cabo lo anterior, se propone el desarrollo de un modelo microscópico de tránsito con el empleo del software de microsimulación Vissim.

2.1 Introducción

Un modelo de simulación microscópica de tránsito simula a detalle una red vial, representando el comportamiento de los vehículos de forma individual.

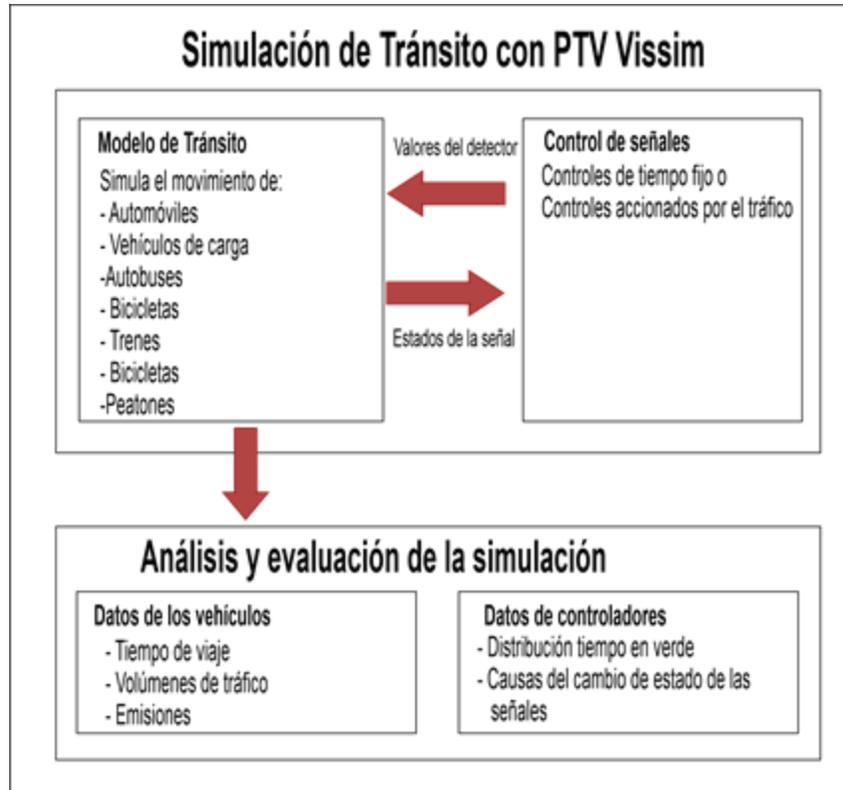
Los modelos de microsimulación son una potente herramienta para analizar redes viales y de transporte con la finalidad de establecer estrategias de gestión y control. En estos modelos se representan las características de operación, de la infraestructura y de las entidades de flujo (automóvil, avión o barco) de los sistemas (Casares Agustín, Galarraga Jorge, 2015), es decir, se puede ver en detalle cada vehículo, observando la ruta que elige, cambios de carril, paradas y otros.

Los modelos de microsimulación proporcionan un mayor entendimiento de las operaciones en una plaza de cobro (Ceballos y Curtis, 2004). En la modelación de las casetas de peaje se integran aspectos como la configuración de las casetas, la composición vehicular, el comportamiento del conductor, la elección del carril para la caseta de peaje; al modelar estos y más factores se tiene una herramienta de gran utilidad para los organismos y/o entidades de transporte encargados del diseño y modernización de las casetas de peaje (Mckinnon et al, 2014).

2.2 El modelo de tráfico

Para la construcción del modelo de microsimulación de este trabajo, se utilizó el software de simulación microscópica denominado Vissim. Desarrollado por la empresa PTV (Planung Transport Verkehr AG), este software se basa en el modelo psico-físico del comportamiento del conductor elaborado por Widemann en 1974 (Casares, 2015).

El software Vissim está basado en un modelo de flujo de tráfico y un modelo de control de señales. A su vez, el primero está integrado por dos modelos, uno de seguimiento del vehículo y otro de cambio de carril. El modelo de control de señales se compone de un conjunto de programas para el control de las unidades lógicas de control del tráfico. En la siguiente figura se ilustra este concepto.



Fuente: PTV VISION, (PTV). Manual del Vissim 11. Año 2019.

Figura 2.1. Simulación del Tránsito con Vissim

2.2.1 Modelo de seguimiento del vehículo

El modelo de flujo de tráfico es fundamental para la simulación en Vissim, dicho modelo se basa en el modelo desarrollado por Wiedemann en 1974 (PTV, 2019). Se utiliza un modelo de percepción psico-física; es decir, se simula la percepción humana y las reacciones que se tienen ante el seguimiento de un vehículo a otro en un proceso de oscilación (Agosta, 2019).

Este modelo consiste en que un vehículo que se mueve rápido, comienza a desacelerar conforme empieza a percibir que el vehículo posterior se mueve más lento, hasta que su velocidad sea inferior, lo anterior con el fin de mantener una distancia de seguridad; éste mismo comenzará a acelerar cuando perciba que dicha distancia lo permita. El movimiento longitudinal del vehículo está influenciado por el vehículo del frente, Vissim toma en cuenta cuatro vehículos posteriores. El comportamiento del conductor se basa en funciones de distribución del comportamiento de la velocidad y distancia. El modelo de seguimiento del vehículo empleado en Vissim ha sido calibrado por el Instituto de estudios del transporte del Instituto Tecnológico de Karlsruhe de Alemania.

En el caso de múltiples carriles, Vissim utiliza un modelo de cambio de carril, el cual considera a los vehículos en los dos carriles adyacentes. En este caso se verifica la posibilidad de seguir circulando con la acción de cambiar de carril, verificando la viabilidad de tener el espacio aceptable entre vehículos de los carriles adyacentes.

Vissim simula el tránsito considerando como unidad al conductor-vehículo, en donde cada conductor tiene un comportamiento con sus características, el cual se asigna a un vehículo específico. El comportamiento del conductor se define por las capacidades técnicas del vehículo. Se denomina atributos a aquellas características que tiene cada conductor-vehículo, los cuales se pueden dividir en tres categorías: especificaciones técnicas del vehículo (longitud del vehículo, velocidad máxima, potencia), comportamiento del conductor y la interdependencia entre cada conductor-vehículo.

El movimiento del conductor-vehículo está influenciado por la percepción del movimiento del vehículo posterior, por la variación de velocidades y la distancia entre vehículos, con estos dos últimos parámetros se establecen valores límites, llamados umbrales. Así, la percepción depende de que tan rápido se mueva el vehículo de frente, lo cual, es una función de la variación de velocidades y la distancia entre vehículos. Ya en la década de los 60's, algunas investigaciones se realizaron para encontrar esos límites de la percepción humana, siendo ésta la base del modelo de seguimiento de vehículo desarrollado por Wiedemann en 1974.

El modelo de seguimiento de vehículos y el modelo de cambio de carril constituyen el modelo de tránsito.

El modelo de tránsito de Wiedemann supone cuatro estados de conducción, que son los siguientes:

- Conducción en libre tránsito, en este estado el vehículo se mueve con la velocidad deseada, ya que no hay vehículo delantero.
- Conducción de acercamiento, en este estado el vehículo reduce su velocidad debido al vehículo delantero para tener una distancia de seguridad deseada.
- Conducción de seguimiento, el conductor sigue al vehículo que esta frente a él, acelerando y desacelerando para mantener una distancia de seguridad más o menos constante, el vehículo es influenciado de forma no consciente por el vehículo delantero.
- Conducción de frenado, el vehículo tiene desaceleraciones medias a altas para evitar una colisión, la distancia de seguridad puede ser no la deseada. Lo anterior se puede presentar si el vehículo delantero puede cambiar la velocidad o un tercer vehículo se incorpora entre ambos vehículos.

Vissim maneja dos modelos de Wiedemann, modelo de 74 y 99, nombrados por el año de su desarrollo. Casares (2015) recomienda que el modelo 74 sea para condiciones urbanas y el 99 para carreteras.

2.3 Elementos de entrada del modelo

La estructura para crear el modelo en el software Vissim, se puede integrar en tres módulos. En el primero esta lo relacionado a la oferta vial, es decir, a la infraestructura del modelo, un segundo abarca lo relacionado a la demanda vial, como el tránsito vehicular y finalmente un módulo que corresponde a los elementos de control del sistema. Una vez integrados los tres anteriores, se obtienen las medidas de desempeño del sistema y una simulación en tercera dimensión.

La infraestructura vial corresponde a la oferta de un sistema de transporte. Vissim permite representar la infraestructura de la red a analizar, las vialidades (se caracterizan por el número de carriles, el ancho de carril, la pendiente de la vialidad, la curvatura), los cruces viales, paradas y estacionamientos, señalamiento (alto, velocidad, reducción de velocidad) que pueda interferir en la operación de los vehículos. Una ventaja es que se pueden utilizar sistemas geográficos referenciados (SIG) para la construcción de la red. También otra gran ventaja es poder utilizar imágenes de fondo provenientes de algún SIG como Google Maps o Google Earth que pueden incorporarse al modelo.

El segundo módulo corresponde a las características del tránsito; a las características técnicas de los vehículos que se incluyen en el modelo, así como especificaciones técnicas; también se incluyen los volúmenes vehiculares ya sea generados en alguna vialidad o dados por una matriz origen-destino, la composición vehicular, velocidades de operación, la aceleración y desaceleración (El software ya trae valores predeterminados). Los enrutamientos de los flujos vehiculares son definidos en este módulo.

Finalmente, en el tercer módulo se definen los elementos que regulan el control del tráfico vehicular, como las reglas de paso de vehículos en intersecciones no semaforizadas, la configuración de los semáforos y su accionar.

En resumen, los elementos básicos para conformar un modelo de Vissim se presentan en el siguiente Cuadro.

Cuadro 2.1. Elementos básicos de un modelo en Vissim

Módulo en Vissim	Elementos
Datos generales	Tiempo de simulación. Inicio y término de la simulación.
Infraestructura	Imagen digital que muestre el área de estudio donde se localice la red vial. Red vial (tipo de vía –autopista, urbano-, número de carriles, ancho, curvatura y elevación). Entronques. Señales de alto, velocidad, reducción de velocidad. Ubicación de alto, como casetas de cobro, estacionamientos, semáforos.
Datos del flujo de tránsito	Volúmenes de tránsito. Composición vehicular. Para ruteo estático: definición en porcentajes, fórmulas o reglas de direccionamiento para cada intersección. Velocidad de los vehículos en flujo libre. Límites de velocidad. Tiempos de viaje. Restricciones de circulación. Tiempos de alto de los vehículos.
Datos de las señales de control	Programación de reglas de decisión en grupos de señales, Vissim emplea diversos programas, como VAP, VSplus, VISSING y otros más.

Fuente: Elaboración propia.

El software incorpora herramientas de evaluación para diferentes escenarios, en las que se indican los cambios necesarios para cada escenario, los cuales se deben de configurar para obtener los resultados requeridos.

Para este trabajo se consideran los siguientes elementos:

- Imagen de fondo (background) sobre la cual se va a cargar la red en estudio.
- Creación de los links y conectores, para el diseño de la red vial.
- Trazo de las rutas de decisión.
- Establecimiento de reglas de prioridad en las zonas de conflicto de las intersecciones, incorporaciones o desincorporaciones.
- Definición de las áreas donde se presentan velocidades más bajas colocando reductores de velocidad.
- Clasificación vehicular.
- Restricciones de circulación para los vehículos seleccionados.
- Programación de reglas de decisión en grupos de señales.

- Volúmenes de tráfico vehicular en los extremos de la red de volúmenes direccionales.
- Tiempos de atención en las casetas de cobro, en Vissim se pueden introducir valores constantes, distribuciones empíricas o teóricas.
- Configuración de los elementos para calibrar el modelo.

2.4 Conclusiones

En este capítulo se presenta la parte teórica de la herramienta a utilizar para el análisis de las casetas de peaje. La microsimulación es una herramienta con gran potencial para analizar el problema, estudios anteriores han mostrado sus ventajas, pero requiere de mayores datos detallados, mismos que deben de obtenerse de estudios en campo o de referencias de otros estudios para el logro deseado. También es necesario contar con datos para la calibración y validación del modelo.

3. Ejemplo de aplicación

En este capítulo se presenta el desarrollo y los resultados de un ejercicio de aplicación realizado en la plaza de cobro de Palmillas de la autopista México-Querétaro.

3.1 Definición de la red de estudio

La plaza de cobro de Palmillas, es parte de la autopista de cuota México-Querétaro (Carretera 57), la cual forma parte de un eje troncal de importancia del país (SCT, 2016). Hay incorporaciones y desincorporaciones viales cercanos a la plaza, estas no son objeto de estudio de este trabajo, sin embargo, resulta de interés observar su posible afectación por la plaza de cobro.

La plaza de cobro se ubica en el km 147+917 de la autopista, es una de las dos plazas de cobro de ésta. La caseta de cobro está entre dos puntos de desincorporación e incorporación de tránsito importantes. Siguiendo el sentido del cadenamiento y antes de llegar a la plaza de cobro se ubica la desincorporación con rumbo a Celaya, y pasando la plaza de cobro está la incorporación de los flujos provenientes principalmente de Toluca. Lo anterior se puede observar en la Figura 3.1. En sentido contrario al cadenamiento (Figura 3.1) se ubica la desincorporación e incorporación de la carretera a Toluca; la desincorporación se ubica aproximadamente 600 metros antes de llegar a la caseta y la incorporación 300 metros antes de la caseta.



Fuente: Elaboración propia con base en Google Earth.

Figura 3.1. Plaza de cobro de Palmillas

Como se observa en la figura anterior, en el tramo se ubican seis estaciones de aforo. Dos se ubican en la plaza de cobro, considerando el sentido del cadenamiento; dos se ubican antes de llegar a la caseta, aproximadamente a dos kilómetros. Las últimas, se localizan aproximadamente a un kilómetro y medio pasando la plaza de cobro. El tramo de la Autopista que comprende las 6 casetas de aforo es la red del estudio, como se aprecia en la Figura 3.2.

Al modelo de microsimulación se integró una imagen de fondo (Figura 3.2), la cual abarca la red de estudio y que ha sido referenciada con los sistemas georreferenciados que proporciona Vissim.



Fuente: Elaboración propia con base en el software Vissim.

Figura 3.2. Red de estudio en Vissim

En la red vial se definen los siguientes elementos:

- Los tramos de la autopista, entronques, salidas y entradas al tramo carretero;
- Rutas de decisión, es decir, las rutas de orígenes y destinos de los flujos de tránsito identificados;
- Las reglas establecidas de prioridad de paso en las zonas de conflicto de las intersecciones, incorporaciones o desincorporaciones;
- Las áreas que se definieron donde se presentan velocidades más bajas colocando reductores de velocidad, en estos casos se tomaron en cuenta las velocidades de operación de diseño;
- Restricciones de circulación para los vehículos seleccionados.

3.2 Geometría de la plaza de cobro

La configuración de la plaza de cobro se identificó con la ayuda de Google Earth, principalmente con la herramienta de Street View, que cuenta con fotografías recientes de la caseta de cobro.

La plaza de cobro cuenta con un total de 22 casetas en ambos sentidos. En el sentido a la Ciudad de México hay 11 casetas, de las cuales siete están abiertas y cuatro permanecen cerradas; en el sentido contrario, se tienen 11 casetas

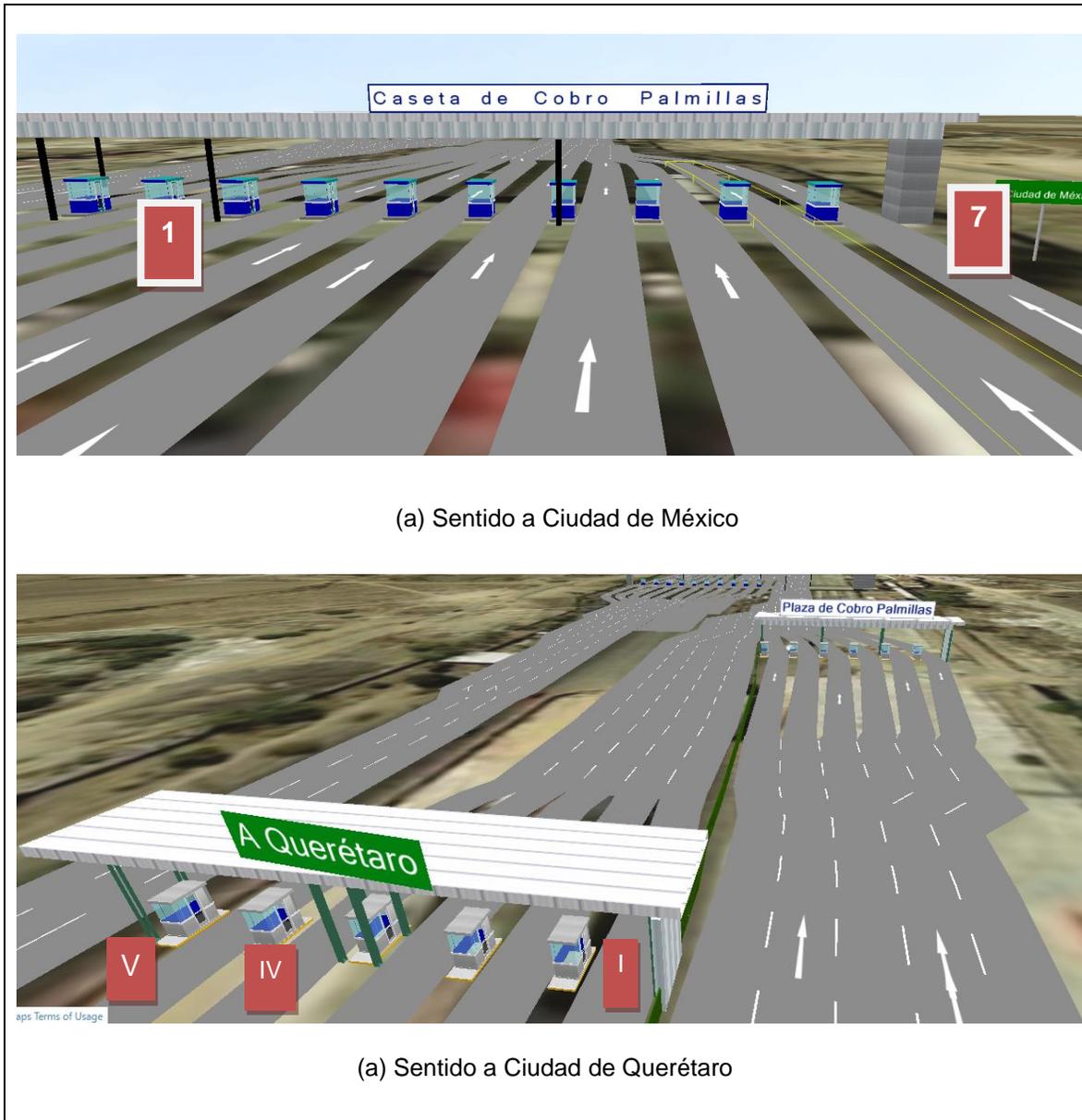
distribuidas en dos líneas como se puede ver en la Figura 3.3, en la primera línea se ubican cinco casetas numeradas del I al V, y en la siguiente línea las numeradas del VI al XI.



Fuente: Elaboración propia con base en Google Earth.

Figura 3.3. Configuración de las casetas de cobro de la plaza de cobro de Palmillas

En el sentido a Ciudad de México, por medio de un viaje de inspección, se pudo observar que hay una caseta en un extremo dedicada exclusivamente al cobro automático (casetas 7). En el extremo opuesto se encontraba una caseta destinada al cobro manual (casetas 1). Estas observaciones se plasmaron en el modelo, como se puede ver en la Figura 3.4



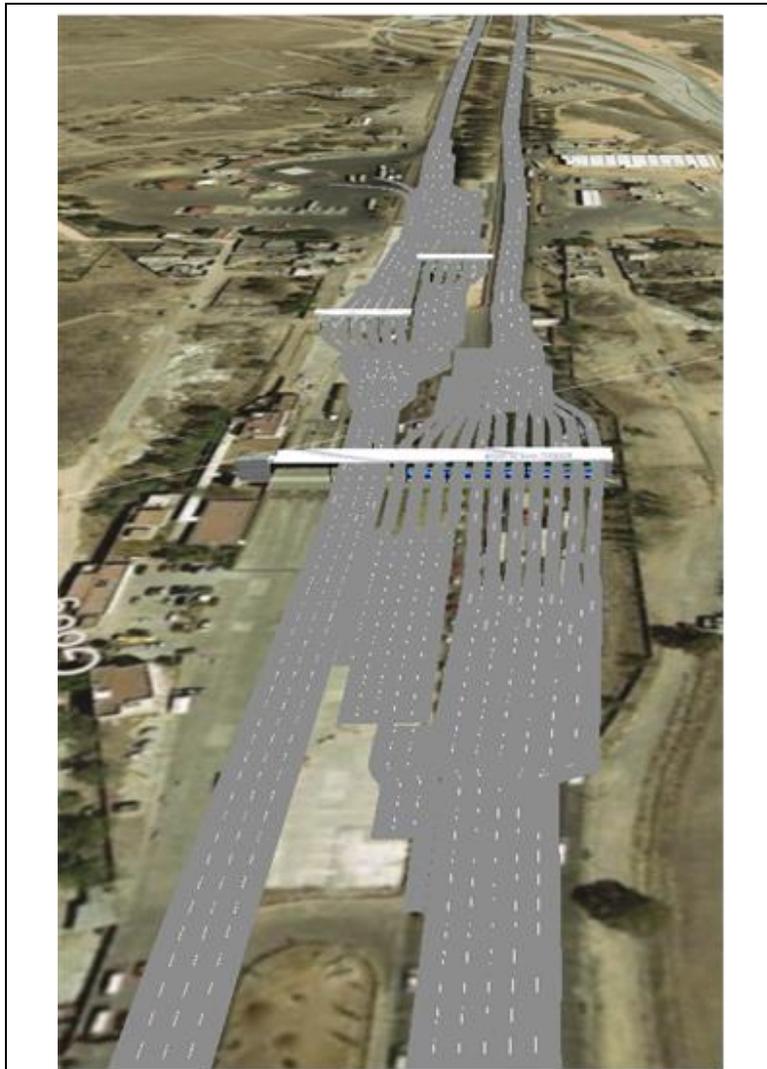
Fuente: Elaboración propia con base en Vissim.

Figura 3.4. Configuración de las casetas de cobro de la plaza de cobro de Palmillas en Vissim

En el sentido a Querétaro, las 11 casetas están operando, se distribuyen en dos líneas paralelas, las primeras cinco se ubican en una línea y aproximadamente 65 metros delante se ubica otra línea con las 6 casetas restantes. En este caso, no fue posible detectar las casetas exclusivas para cobro en efectivo y cobro automático. Por lo anterior en estas casetas, el cobro puede ser manual o automático. En la Figura 3.4 se muestra una imagen con la ubicación y el número de casetas de cobro. En la primera línea de casetas, las casetas III, IV y V se ubican en un extremo.

La configuración de los carriles cercanos a la caseta, el número en que se incrementan, su configuración y el ancho también se identificaron con la ayuda Google Earth, principalmente con la herramienta de Street View. También se pudieron detectar los límites de velocidad en las cercanías de la plaza de cobro por medio de la señalización horizontal y vertical.

Vissim permite a través de otros medios conformar la red de estudio, en este caso la herramienta Google Earth ayudó a realizar esta parte del estudio.



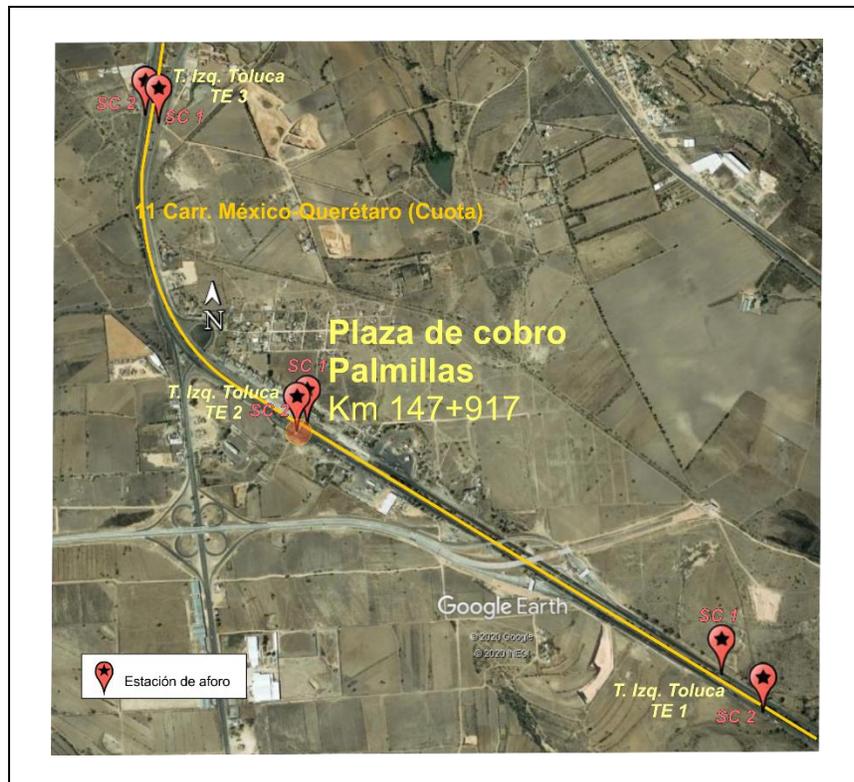
Fuente: Elaboración propia con base en Google Vissim.

Figura 3.5. Plaza de cobro en Vissim

3.3 Datos de la demanda

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), mediante la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) realiza el registro de volúmenes de tránsito y clasificación vehicular mediante estaciones de aforos ubicados en distintos puntos sobre la Red Federal de Carreteras, y dichos datos son publicados anualmente en lo que se denomina “Datos Viales”. Para el presente trabajo, se tomó la información del documento de “Datos Viales edición 2019”, es importante mencionar que contiene los datos registrados en el año 2018.

En particular, se utilizaron los datos de tres estaciones de aforo que se localizan en la autopista México-Querétaro (carretera Mex-057), estas son, las ubicadas en la Caseta de Cobro Palmillas, en el Tramo Izquierdo Toluca antes de llegar a la caseta y Tramo Izquierdo Toluca pasando la caseta, como se muestra en la Figura 3.6.



Nota: TE, Tipo de estación.

Fuente: Elaboración propia con base en Datos Viales 2019 y Google Earth.

Figura 3.6. Estaciones de aforo cercanas a la plaza de cobro de Palmillas

En el Cuadro 3.1 se presentan los datos utilizados para el modelo, en ella se muestra las estaciones de aforo con sus respectivos datos registrados, se presenta el lugar y el kilómetro donde está ubicada la estación. El tipo de estación (TE), el cual indica según el cadenamamiento si se encuentra antes de la intersección (TE 1),

si se encuentra después de la intersección (TE 3) y si está en la intersección (TE 21). El sentido de circulación en función del cadenamamiento (1 en sentido del cadenamamiento y 2 en contra del cadenamamiento). El Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) y el Tránsito Horario de Proyecto (THP), el cual se calcula con el factor K' proporcionado por Datos Viales (2019). Y por último la clasificación vehicular en función del tipo y número de vehículos.

En 2018, el tránsito diario promedio anual (TDPA) de la autopista México- Querétaro en la Plaza de Cobro de Palmillas fue de 21,643 vehículos en cada uno de los sentidos de circulación. De éste volumen, el 57.8% correspondieron a automóviles y motocicletas, el 4.5% a autobuses y el 37.7% a camiones en sus distintas categorías. Utilizando el factor para determinar el volumen horario de proyecto (K'), 0.077 (Datos viales, 2019), para el caso de la Estación de Palmillas se estima un volumen de proyecto de 1,667 vehículos por hora en cada sentido, el cual se utilizará para llevar a cabo las simulaciones de la operación de la plaza de cobro de estudio.

Cuadro 3.1. Distribución de la demanda para la hora de proyecto

CARR: México - Querétaro (Cuota)		RUTA : MEX-057-MEX-057D										
No. Índice	Carretero	LUGAR	KM	ESTACION		TDPA	THP=TDPA*K	CLASIFICACION VEHICULAR no. VEHÍCULOS				
				TE	SC			A	B	C	TS	TSR
11		Case ta de Cobro Palmillas	145.8	2	1	21,643	1,667	963	75	185	358	85
11		Case ta de Cobro Palmillas	145.8	2	2	21,643	1,667	963	75	197	358	85
11		T. Izq. Toluca	148.5	1	1	25,868	1,578	879	66	205	350	87
11		T. Izq. Toluca	148.5	1	2	26,924	1,454	781	70	196	336	81
11		T. Izq. Toluca	148.5	3	1	38,953	2,220	1,277	91	278	477	113
11		T. Izq. Toluca	148.5	3	2	38,967	2,455	1,328	110	349	547	137

Nota: El Tránsito Horario de Proyecto (THP) se determina utilizando el factor K, que estima Datos Viales. TE, tipo de estación; SC, sentido de circulación; TDPA, tránsito diario promedio anual registrado en la estación.: A, vehículos ligeros; B, autobuses; C, camiones; TS, Tractor y semirremolque y TSR, tractor, semirremolque y remolque.

Fuente: Elaboración propia

La demanda de transporte de cada escenario se estima con base en el porcentaje de la clasificación vehicular del Cuadro 3.1. Para el escenario 1 se considera que el 100 por ciento de la demanda realiza pago manual, para cada escenario se determina el porcentaje de vehículos de cobro manual y automático, sólo como ejemplo se presenta en este apartado el porcentaje empleado para el caso base, como se muestra en el Cuadro 3.2.

**Cuadro 3.2. Distribución de la demanda para la hora de proyecto
Escenario 3, Caso Base**

Porcentaje para escenario 50% Manual - 50% Automático																
CARR: México - Querétaro (Cuota)																
No. Índice Carretero	ESTACION LUGAR	ESTACION					CLASIFICACION VEHICULAR EN PORCIENTO Manual					CLASIFICACION VEHICULAR EN PORCIENTO Automático				
		KM	TE	SC	TDPA	THP=TDPA*K	A	B	C	TS	TSR	A	B	C	TS	TSR
		11	Caseta de Cobro Palmillas	145.8	2	1	21,643	1,667	29%	2%	6%	11%	3%	29%	2%	6%
11	Caseta de Cobro Palmillas	145.8	2	2	21,643	1,667	29%	2%	6%	11%	3%	29%	2%	6%	11%	3%
11	T. Izq. Toluca	148.5	1	1	25,868	1,578	28%	2%	7%	11%	3%	28%	2%	7%	11%	3%
11	T. Izq. Toluca	148.5	1	2	26,924	1,454	27%	2%	7%	12%	3%	27%	2%	7%	12%	3%
11	T. Izq. Toluca	148.5	3	1	38,953	2,220	29%	2%	6%	11%	3%	29%	2%	6%	11%	3%
11	T. Izq. Toluca	148.5	3	2	38,967	2,455	27%	2%	7%	11%	3%	27%	2%	7%	11%	3%

Fuente: Elaboración propia

Es de gran importancia para el desarrollo de modelos de tránsito, la disponibilidad de datos de demanda de tránsito, en este caso los datos viales emitidos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

3.4 Tiempos de atención de las casetas de cobro

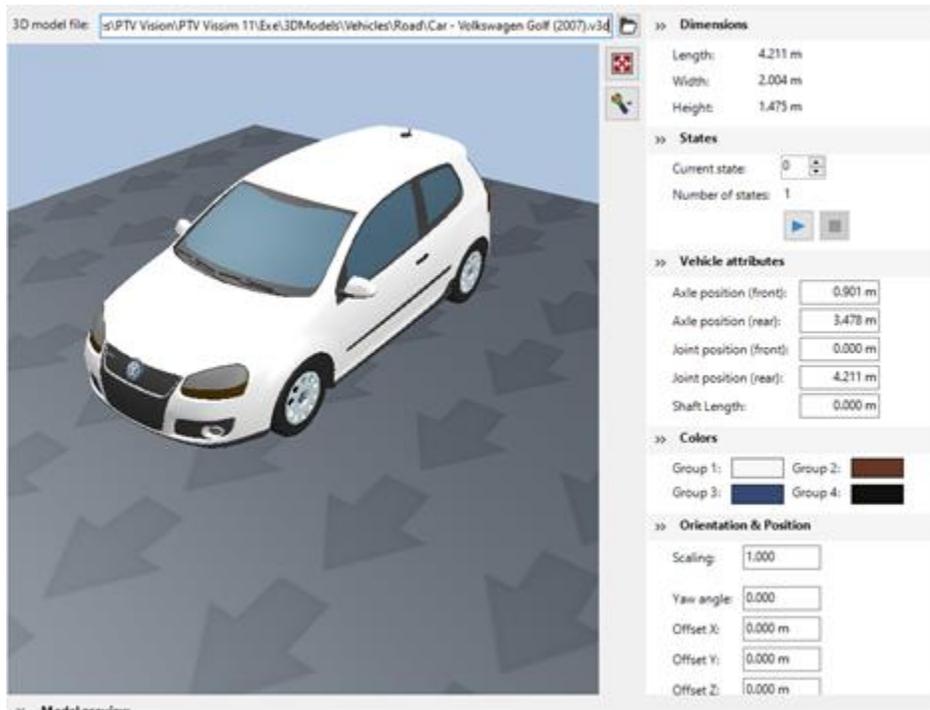
Para el modelo se requirió los tiempos de atención en casetas, los cuales son suministrados a Vissim. El software puede admitir tiempos constantes o una distribución de probabilidad.

Si bien se cuenta con tiempos constantes, como los descritos en el apartado 2.6 de este trabajo, estos fueron simulados en ejercicios sencillos de simulación, encontrándose resultados subvalorados, por ello se buscó otra fuente de información.

Para este caso, se consideraron los datos de tiempo de atención en casetas del trabajo de Pérez (2018). Pérez realizó una muestra de 50 tiempos de atención en casetas, diferenciando por tipo de vehículo y tipo de pago (Manual y automático), en el caso del tipo de vehículos consideró: automóviles, autobuses, camiones de 2 ejes, camiones de 3 ejes, tractocamiones con 3 ejes y semirremolque con 2 ejes, tractocamiones con 3 ejes y semirremolque con 3 ejes y finalmente para tractocamiones con semirremolque y remolque. A los datos de cada muestra se le hizo un análisis estadístico y una prueba de bondad de ajuste. Estas se presentan en el Anexo A.

3.5 Tipos de vehículos

Los tipos de vehículos que se consideraron son automóviles, autobuses, camiones, tractocamiones con semirremolque y tractocamiones con semiremolque y remolque. Para cada tipo se consideraron modelos de vehículos predeterminados disponibles en Vissim, y lo más cercano a los que se tienen en los documentos de Gutiérrez (2019). Estos se encuentran en el Anexo B. Como ejemplo se muestra un modelo para el tipo de vehículo de automóviles.



Fuente: Vissim, PTV.

Figura 3.7. Modelo de vehículo predeterminado de Vissim

3.6 Escenarios de las simulaciones

Con el uso del programa Vissim se busca determinar el tiempo total que tomaría el cobro de peajes a los vehículos, encontrando así el tiempo de retraso que sufrirían los conductores en la plaza de cobro de Palmillas.

Se consideran las combinaciones de cobros manuales y cobro electrónico presentadas en el Cuadro 3.3. En el primer escenario se considera que el pago de todos los vehículos atendidos sea de forma manual, es decir, se hace un pago en efectivo, si se requiere se da un cambio y se proporciona una emisión del recibo correspondiente. En el segundo escenario, se considera una combinación del 75% de los vehículos realizan un pago manual y el 25% restante lo realiza con cobro

electrónico. En el tercer escenario se supone que la mitad de los cobros es manual y el otro 50% es con cobro electrónico; este escenario en el cual se tiene el mismo porcentaje en ambos cobros es el que se consideró como el escenario base o caso base. En el cuarto escenario se considera que el 25% de los cobros es manual y el 75% es con cobro electrónico; finalmente en el quinto escenario se supone que el total de los cobros son electrónicos.

Es importante señalar que las casetas que tienen el flujo de tránsito con sentido a la Ciudad de México, cuentan con dos casetas dedicadas, una a pago manual y la otra a pago automático.

Cuadro 3.3. Escenarios de la simulación

Número de escenario	Descripción
1	Se supone que el pago en todos los casos se efectúa de manera manual.
2	Se supone que el 75% de los pagos es manual y el 25% con cobro electrónico.
3	Caso base, se supone que la mitad de los pagos es manual y la otra mitad es con cobro electrónico.
4	Se supone que 25% de los pagos es manual y 75% es con cobro electrónico.
5	Se supone que todos los pagos con cobro electrónico.

Fuente: Elaboración propia

3.7 Calibración y validación

Se simuló un total de 7,200 segundos, de los cuales, los primeros 3,600 fueron parte del precalentamiento o prellenado de la red; estos no se consideraron para los resultados obtenidos. El análisis se realiza para el intervalo de 3,600-7,200 segundos, intervalo que se utiliza para evaluar el modelo.

La calibración del modelo se realizó mediante ajustes en los parámetros de Wiedeman 99, este tiene 10 parámetros para el cálculo de los límites de la percepción del conductor. Para este trabajo se siguieron los valores de los documentos “Vissim Calibration Setting” (PTV, 2018), el Manual de Vissim 11 (PTV, 2019) y el documento de Casares & Galarraga (2015).

Para la validación del modelo, se realiza una comparación de los volúmenes vehiculares modelados y observados. Para este caso, el volumen a comparar es el de las estaciones de aforo ubicadas en la plaza de cobro Palmillas.

El estadístico empleado para la validación es el denominado GEH, el cual se calcula con el volumen de campo (C) y el volumen obtenido en el modelo (M). En forma general se considera aceptable un $GEH < 5$ (Feldman, 2012 y FHWA, 2004). La fórmula para calcular el GEH es la siguiente.

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M_C)^2}{M + C}}$$

Cuadro 3.4. Datos de validación

Plaza de cobro	Volumen Aforos	Volumen Modelo	GEH
Palmillas dirección a CDMX	1,667	1,643	0.4
Palmillas dirección a Oro.	1,667	1,655	0.8

Fuente: Elaboración propia con base en resultados en Vissim.

En este caso, se realizaron 15 repeticiones (FWWA, 2004) para cada escenario planteado y a continuación se presenta el promedio de estas repeticiones.

3.8 Resultados y comparación de los escenarios

En esta sección se presentan los resultados que se obtienen al comparar los diferentes escenarios propuestos. Se consideran como medidas de desempeño de la plaza de cobro: los tiempos de demora en cola, la longitud de cola, tasa de ocupación de las casetas y los vehículos totales simulados. Los resultados son la evaluación de 15 corridas para cada escenario (FWWA, 2004).

3.8.1 Tiempos de demora

El tiempo de demora es el tiempo promedio que permanece el vehículo en espera, ya sea en la zona de espera para tal motivo o en la cola para pasar a realizar su pago.

En la Figura 3.8, se presentan los tiempos promedios de demora que tienen los vehículos en la cola, antes de realizar su pago en la caseta.

En el caso de las casetas que van hacia la ciudad de México se puede observar que el tiempo promedio de todas las casetas en el escenario tres (base) es de 2.40 minutos.

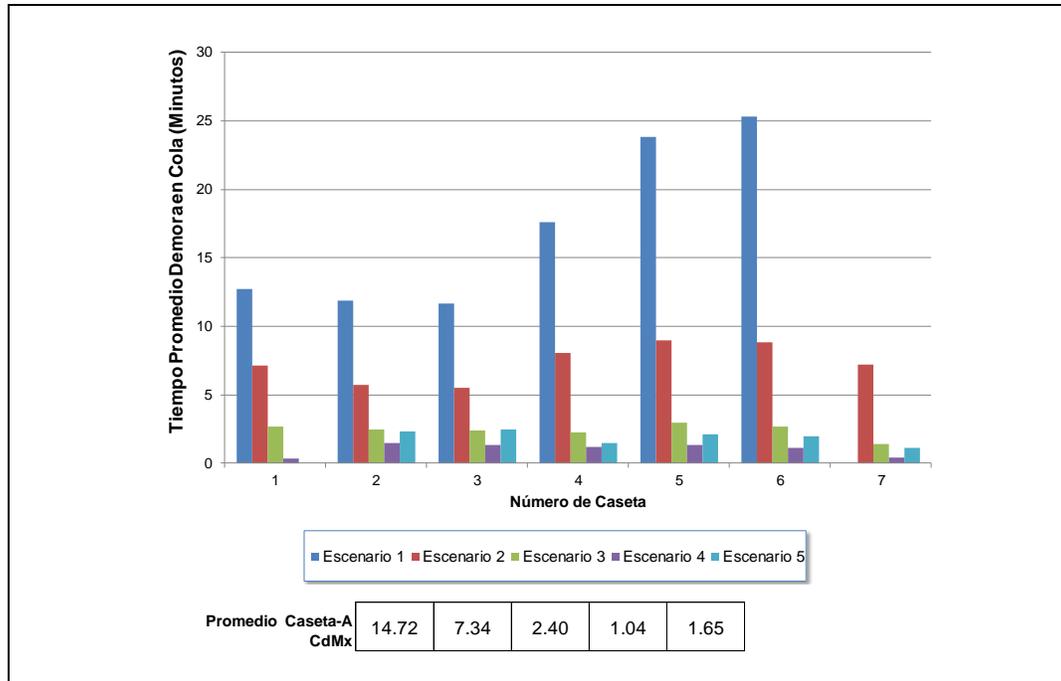
Comparando el escenario uno, en el cual los usuarios pagan totalmente de forma manual, con el escenario base, el tiempo promedio de todas las casetas se eleva a 14.72 minutos lo que representa un aumento del 612 por ciento; es importante comentar que en este escenario se reducen el número de casetas, ya que de siete una es dedicada totalmente al pago en automático.

En el escenario dos comparado con el base, se observa que el tiempo promedio se incrementa a 7.34 minutos, lo que significa un incremento del 305 por ciento.

En el caso del escenario cuatro, en el cual se reduce el porcentaje de vehículos que realizan el pago manual, el tiempo promedio se reduce a 1.04 minutos lo que representa una reducción de 66.8 por ciento respecto al escenario base.

En el escenario cinco, donde los usuarios pagan enteramente de forma automática, el tiempo promedio en espera es de 1.65 minutos; este valor es superior al del escenario cuatro debido a una reducción del número de casetas que operan.

Como se observa, el tener casetas dedicadas incrementa los tiempos promedio de espera y un mayor uso del suelo. Posiblemente el que todas las casetas sean de uso mixto reduciría considerablemente los tiempos del escenario cinco.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados de Vissim, PTV.

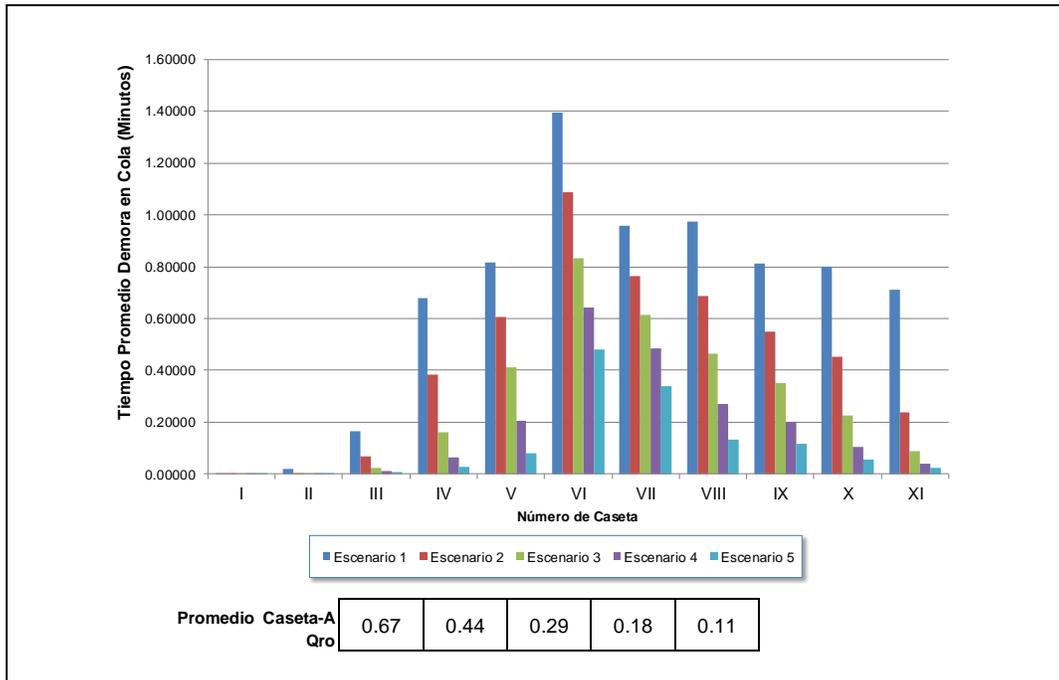
Figura 3.8. Tiempo Promedio Demora en cola Casetas sentido a Ciudad de México (Minutos)

En el caso de las casetas que tienen el sentido hacia Querétaro, se observa que en el caso base se tiene un tiempo promedio de 0.29 minutos. En el escenario en donde todos los vehículos realizan un pago manual, este tiempo se incrementa a 0.70 minutos lo que representa un incremento del 233.7 por ciento. Si solamente el 75% de los vehículos hacen pago manual, el tiempo promedio de demora se reduce a 0.44 minutos lo que representa un incremento del 149% respecto al caso base. En el escenario cuatro en donde el 75% es manual, el tiempo promedio de demora de todas las casetas se reduce a 0.18 minutos lo que equivale una reducción del 37% respecto del caso base. Finalmente, el último escenario donde todos los vehículos realizan un pago automático el tiempo promedio de demora es de 0.1 minutos logrando una reducción del 60.7 por ciento respecto al caso base (ver Figura 3.9.)

Una reducción de la participación de los vehículos que pagan manualmente reduce los tiempos promedios de demora en cola y sucede lo contrario entre mayor sean los vehículos que realizan el pago manual implica un incremento en el tiempo promedio de demora que hay que esperar en cola para pasar a la caseta de cobro. Además, se observan variaciones sustanciales en los tiempos de demora al incrementar o disminuir la demanda los vehículos cuyo pago de cobro es manual.

Se puede observar que el tiempo promedio de todas las casetas comparado con aquellas con sentido hacia Querétaro, es sustancialmente mayor que los tiempos de sentido contrario; una de las razones es que de sentido hacia Querétaro hay 11 casetas y en el sentido contrario sólo siete casetas. La configuración que tienen las casetas con sentido hacia Querétaro, permite contar con un mayor número de

casetas, logrando que en cualquiera de los escenarios el tiempo promedio sea mucho menor.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados de Vissim, PTV.

Figura 3.9. Tiempo Promedio Demora en cola Casetas sentido a Querétaro (Minutos)

En el cuadro 3.5 se muestra el tiempo total de demora de todos los vehículos que pasaron la caseta, durante la simulación, sin considerar un promedio de ocupación de vehículo. En este cuadro se observa las variaciones que hay entre cada uno de los escenarios respecto al escenario base.

En lo que respecta a las casetas que permiten el flujo a la ciudad de México, se observó que en el escenario base hay un total de 66 horas, en el escenario uno el número de total de horas es de 315.5, lo que representa un incremento del 1,478 por ciento%. El total de horas para el escenario dos es de 186.8, lo que representa un incremento de 283% respecto al escenario base. En el caso de los escenarios cuatro y cinco en los cuales se reduce la participación de los vehículos que realizan pago manual, se tiene un total de 31 y 53.7 horas, lo que representa una reducción del 53 y 19% respectivamente. En el escenario cinco hay que tomar en cuenta que una de las casetas destinadas exclusivamente al pago de forma manual se mantiene sin dar servicio, por lo que de siete casetas se reducen a seis y por ello el número de horas y el porcentaje de reducción de este escenario.

Cuadro 3.5. Tiempo total de demoras del total de vehículos (Horas)

Caseta		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3 Caso Base	Escenario 4	Escenario 5
Casetas hacia CdMx	1	47.7	26.4	9.9	0.9	0.0
	2	36.8	21.3	11.2	7.7	10.0
	3	31.7	16.3	8.2	5.0	11.0
	4	64.3	28.8	8.7	5.2	7.4
	5	81.4	33.6	12.2	6.4	11.4
	6	53.6	32.8	10.4	4.6	9.8
	7	0.0	27.7	5.4	1.3	4.2
Total Caseta a CdMx		315.5	186.8	66.1	31.0	53.7
Casetas a Querétaro	I	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	II	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	III	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
	IV	2.4	1.4	0.6	0.2	0.1
	V	2.7	2.2	1.7	0.9	0.4
	VI	4.2	3.6	3.0	2.6	2.2
	VII	2.8	2.5	2.2	2.0	1.6
	VIII	3.6	2.7	1.9	1.1	0.5
	IX	2.6	1.9	1.3	0.7	0.4
	X	2.7	1.4	0.6	0.2	0.1
	XI	1.6	0.3	0.1	0.0	0.0
Total Caseta a Cd. Qro.		22.9	16.2	11.4	7.8	5.2

Fuente: Elaboración propia con base en resultados en Vissim.

3.8.2 Longitud promedio de cola (metros)

Esta medida es la longitud promedio en metros, de la cola de espera para hacer el pago en la caseta. Se mide para todas las casetas de la plaza de cobro de Palmillas y para cada uno de los escenarios establecidos.

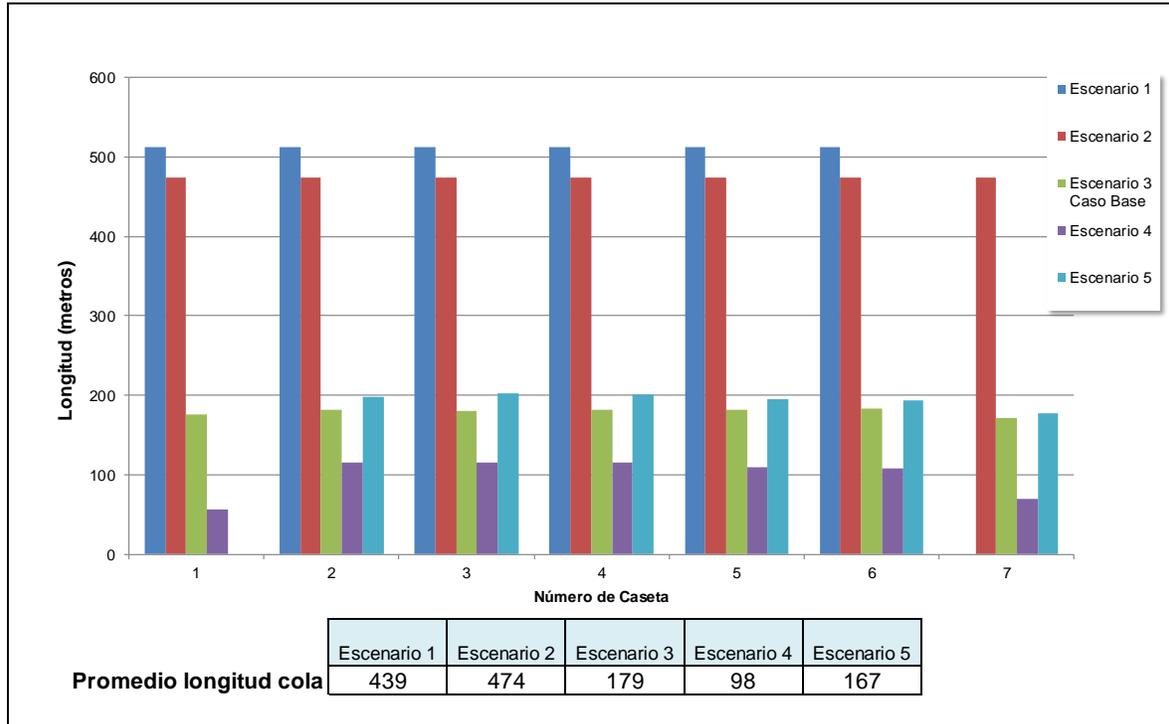
En la Figura 3.10, se muestran los resultados de las casetas con sentido hacia la Ciudad de México. En esta Figura se observa que para cada una de las casetas en el escenario base, que corresponde al escenario tres, se tiene una longitud promedio de 179 metros.

En el escenario 1, en promedio las casetas tienen una cola de 439 metros, lo que representa un incremento promedio del 183% respecto del caso base.

En el caso del escenario dos, la cola promedio es de 474 metros, un incremento del 164%. En el escenario cuatro, en el cual la participación del cobro manual se reduce

al 25%, se tiene una cola promedio de 98 metros, lo que representa una reducción del 55% respecto del caso base.

Finalmente, en el escenario cinco en donde el 100% del cobro es automático y solo se cuenta con 6 casetas, se tiene una cola de 167 metros. Los valores absolutos y variaciones de porcentaje se presentan en el Anexo C.

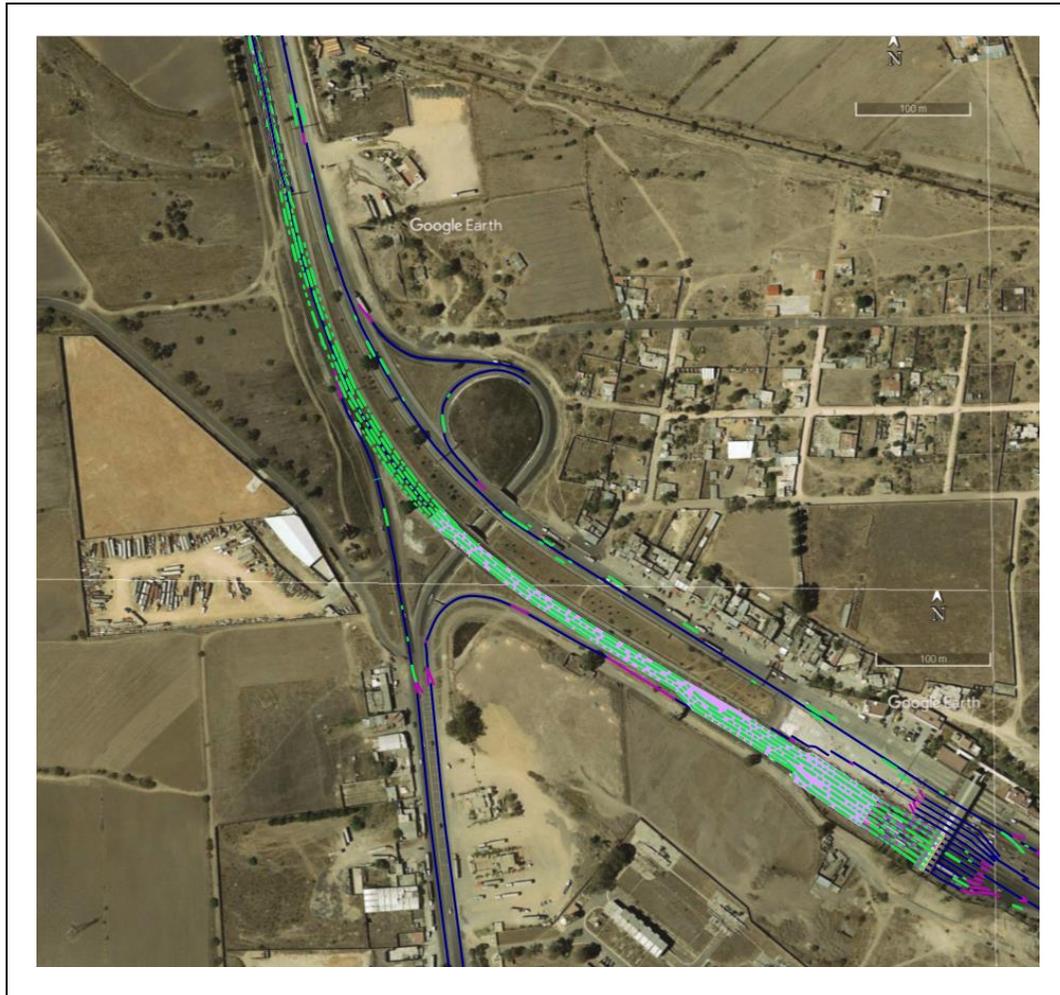


Fuente: Elaboración propia con base en resultados de Vissim, PTV.

Figura 3.10. Longitud de cola de casetas en sentido a Ciudad de México

Cabe mencionar que en los escenarios 1 y 2 se generaron largas colas. En la Figura 3.10 se muestra el promedio, sin embargo, alcanza valores máximos de 527.7 metros en ambos escenarios, como se observa en la Figura 3.11, en donde el flujo vehicular está identificado por color verde, y la cola es la sección coloreada con lila. Los 527 metros pasan por la incorporación de Toluca a la autopista. En el software Vissim se estableció un límite de cola de 500 metros, sin embargo, se puede observar en la figura 3.11, que la fila es aproximadamente de 827 metros, los cuales abarcan la desincorporación de la carretera a Toluca, en este caso la fila no es únicamente por la caseta, también por los vehículos en espera para incorporarse a la carretera a Toluca, detenidos por la cola de espera de pago a la caseta.

En los casos de que el pago sea del 100 o 75 por ciento manual, la cola de espera para el pago en caseta, afecta la circulación en la autopista y en vialidades cercanas a ésta como puede observarse en la Figura 3.11.

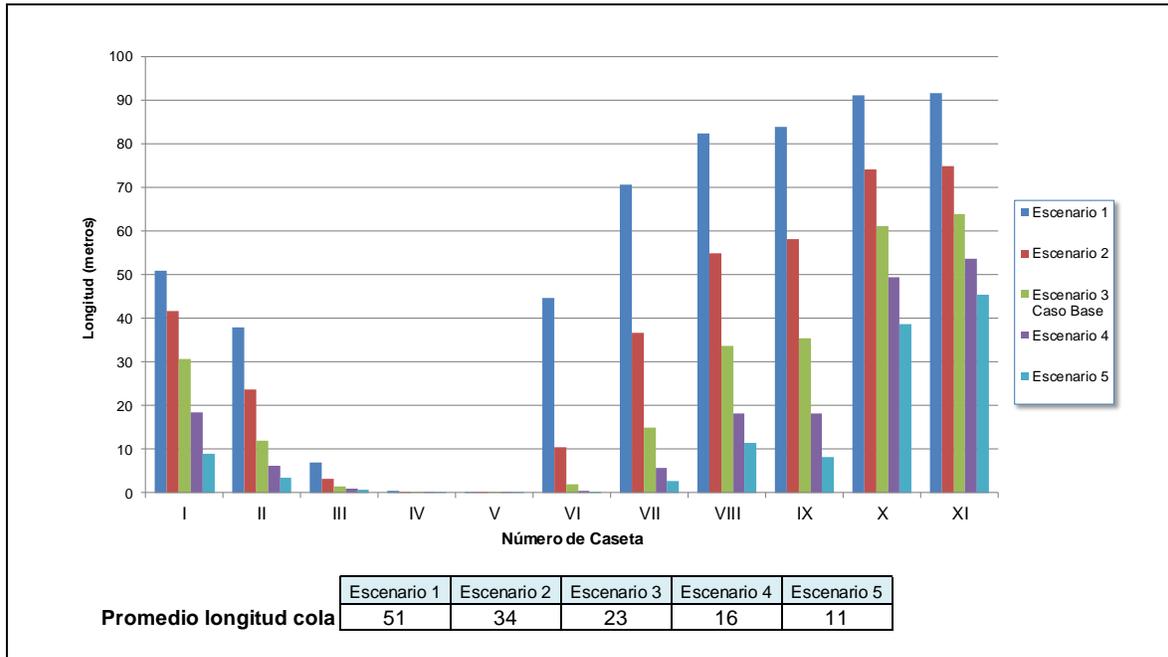


Fuente: Elaboración propia con base en resultados de Vissim, PTV.

Figura 3.11. Longitud máxima de cola de casetas en sentido a Ciudad de México en escenario 1

En el caso de las casetas que atienden el flujo que va hacia la ciudad de Querétaro, las colas promedio de las 11 casetas son mucho menores que las del sentido contrario. Los factores que favorecen la reducción de este parámetro en este caso, es el número de casetas que atienden que son 11 en total, esto último permite aprovechar el área de la Plaza de Cobro. Para el escenario uno, la longitud promedio de las 11 casetas es de 51 metros, para el escenario dos la longitud promedio es de 34 m, para el escenario tres es de 23 m, para el escenario cuatro es de 15 m y finalmente para el escenario cinco es de sólo 11 m. Cabe destacar que aquellas casetas III, I y V ubicadas en un extremo son las que tienen la menor longitud promedio de cola de espera (Figura 3.12.).

En cuanto a la reducción porcentual respecto al caso base, se obtuvo que en el escenario 1, las casetas con un incremento superior al 100% porcentual fueran en específico las casetas II, III, VI y VII, respecto del caso base. En el caso del escenario dos hay un incremento promedio del 71% respecto al caso base. En el escenario 4 se tiene una reducción promedio en las colas del 42%. Finalmente, en el escenario 5 se tiene una gran reducción promedio del 59% en todas las casetas.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados de Vissim, PTV.

Figura 3.12. Longitud de cola de casetas en sentido a Querétaro.

En los casos en donde el pago en caseta es principalmente vía automática, las colas son considerablemente menores como se observa en la Figura 3.13. En esta figura se observa la longitud de las colas coloreadas en color lila, que contrastan con la observada en la Figura 3.11.



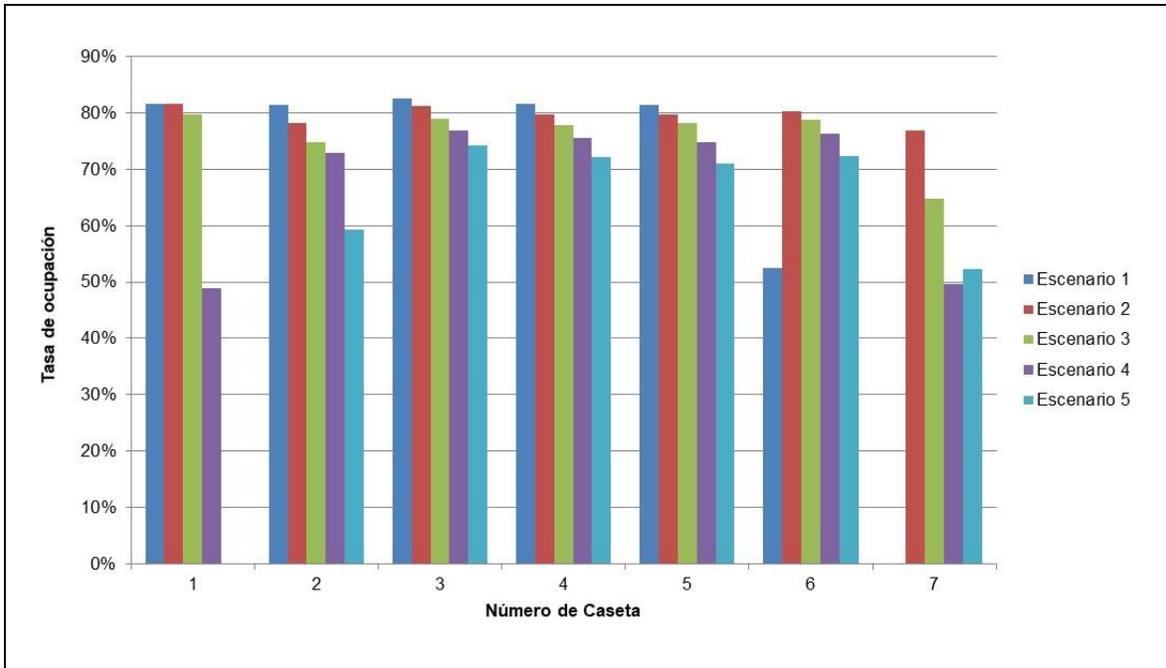
Fuente: Elaboración propia con base en resultados de Vissim, PTV.

Figura 3.13. Longitud de cola en el escenario 5

3.8.3 Tasa de ocupación de las casetas de cobro

Esta medida de desempeño se refiere al valor porcentual del tiempo que la caseta estuvo ocupada.

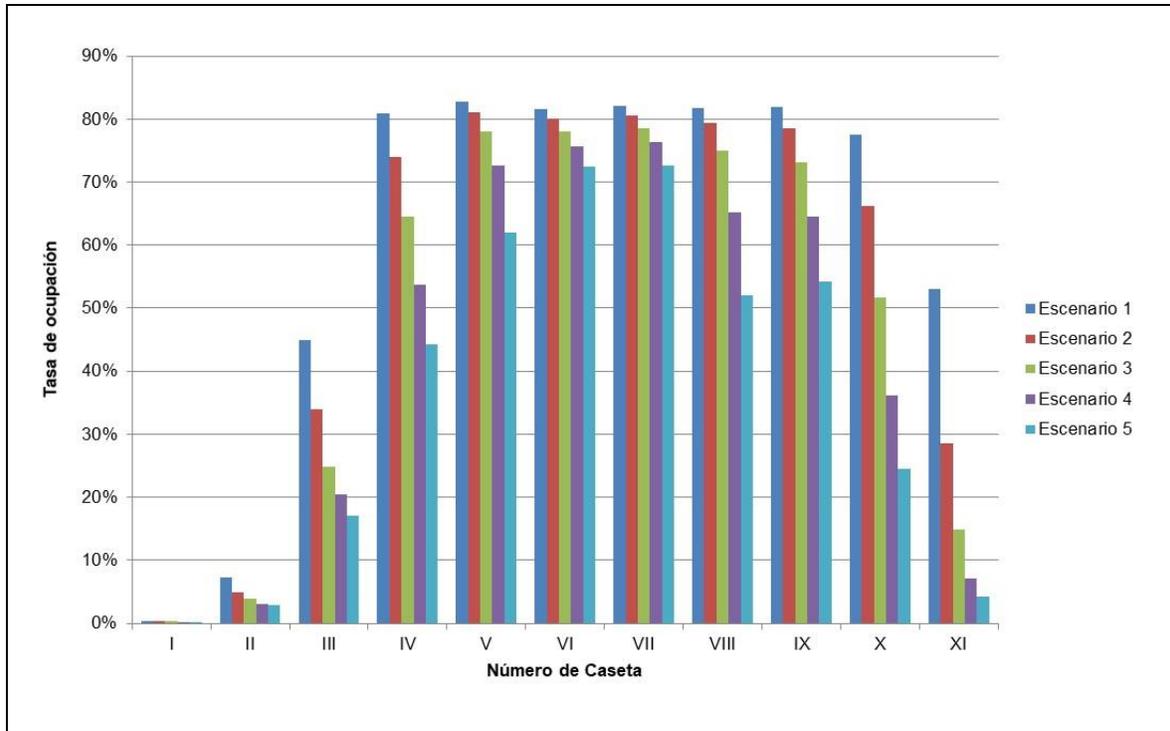
La Figura 3.14., muestra el porcentaje de ocupación promedio de las siete casetas con el sentido a la Ciudad de México. En estas se puede observar en el escenario uno, las casetas no sobrepasen un 80% de su ocupación, y el promedio de ocupación de todas las casetas es el 66%. En el caso del escenario dos, se observa que también las casetas no sobrepasan el 80% de su ocupación, en este escenario el promedio de ocupación de todas las casetas es del 80%. En el escenario tres que es el escenario base se observa una reducción en la ocupación de las casetas, así como el promedio de todas las casetas el cual es del 76%. El escenario cuatro, presenta una reducción en la ocupación de las casetas que va del 49% hasta el 77% el promedio de ocupación por todas las casetas es del 68%. Finalmente, en el escenario hay una reducción notable en la ocupación de las casetas, la tasa de ocupación de todas las casetas es del 57%.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados de Vissim, PTV.

Figura 3.14. Porcentaje de ocupación de Casetas en sentido a Ciudad de México

En la figura 3.15 se presenta el porcentaje de ocupación de las casetas que tienen el sentido a la ciudad de Querétaro. En esta gráfica se puede observar de forma general, que las casetas cuatro hasta la diez son las que tienen mayor tasa de ocupación. En el escenario base, se observa una tasa de ocupación promedio de todas las casetas del 76%. En el escenario uno se observan tasas de ocupación del 80%, sin embargo, hay casetas que tienen tasas de ocupación muy bajas (40% y 7%), por lo tanto, el promedio de ocupación de todas las casetas es del 61%. En el escenario dos, la tasa de ocupación de las casetas se reduce en un rango que va del 5% hasta el 81%, la tasa de ocupación promedio de todas las casetas es del 55%; inferior al escenario uno, pero superior al caso base. En el escenario cuatro se reducen ligeramente la tasa de ocupación de las casetas, al igual que la tasa promedio ya que esta es del 68%. En último lugar, el escenario cinco, las casetas presentan una menor tasa de ocupación como se observa en la Figura 3.15, y se tiene una tasa de ocupación promedio del 57%.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados de Vissim, PTV.

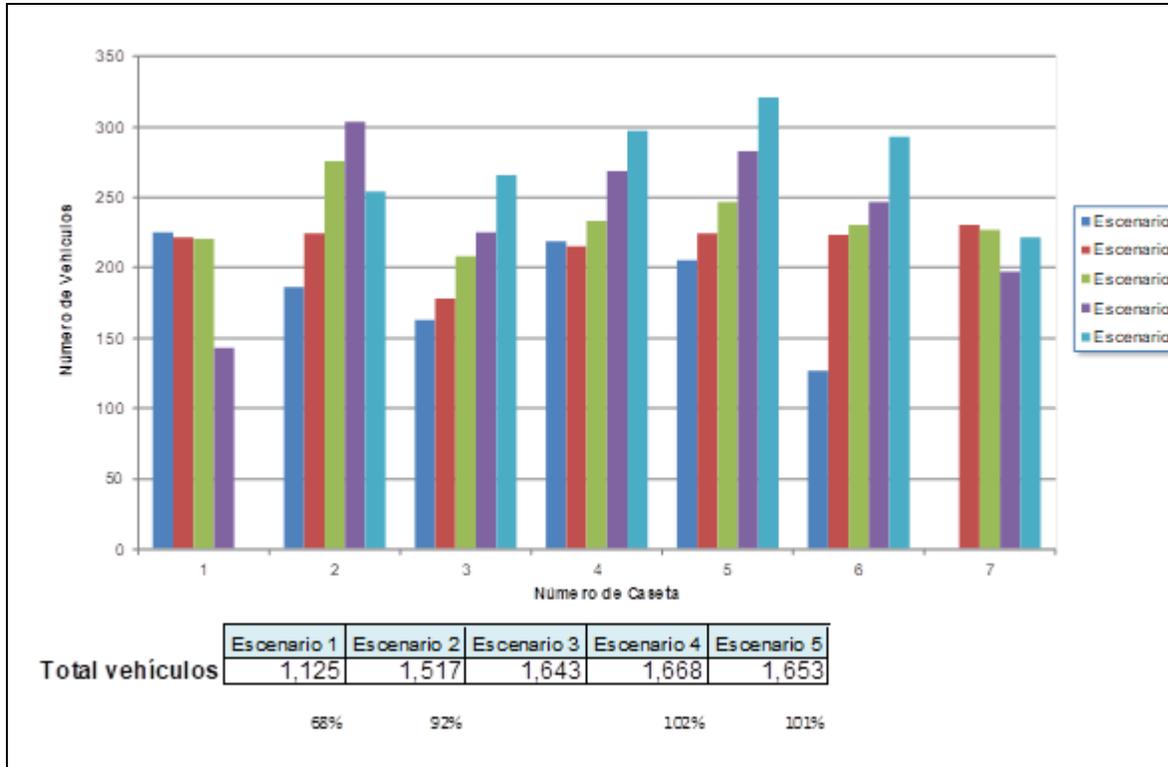
Figura 3.15. Porcentaje de ocupación de Casetas en sentido a Querétaro.

3.8.4 Total de Vehículos en la simulación

Otro de los resultados obtenidos de la simulación es el número de vehículos simulados en todo el sistema o en algún punto en particular. Para el modelo, esta medida de eficiencia es el número de vehículos que pasan la caseta de cobro. El modelo proporciona esta medida por caseta y por el total de casetas por sentido.

En el caso de las casetas con sentido a la ciudad de México, se observa que las casetas centrales tienen un patrón semejante, el cual es una línea ascendente del escenario uno al escenario cinco. En las casetas laterales, el comportamiento es diferente ya que el número de vehículos decrece en el escenario cuatro y cinco, la razón es que los vehículos llegan directamente a las casetas centrales, y cuando la participación de los vehículos que pagan manual es inferior al 50 por ciento, los tiempos de atención en caseta son menores y permite que estas atiendan un mayor número de vehículos. En la Figura 4.15, se puede observar el total de vehículos que pasan la caseta en cada escenario. El escenario tres que es el escenario base, tiene un total de 1,643 vehículos, el escenario uno se reduce a 1,125 vehículos, es decir, una reducción del 32%. En el caso del escenario dos el número total de vehículos es de 1,517, lo que representa una reducción del 8% respecto del caso base. Los escenarios cuatro y cinco tienen un total de vehículos de 1,668 y 1,653 lo que

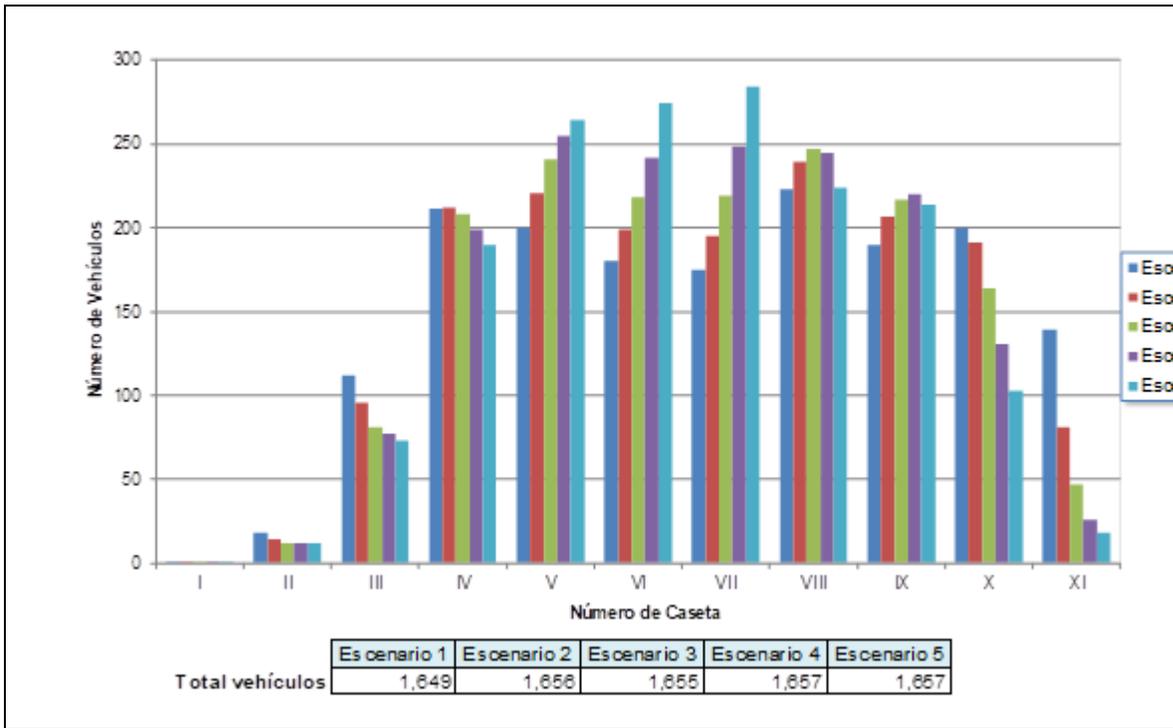
representa un aumento del 2% y 1% respectivamente. Los datos de la Figura 3.16, se encuentran en el anexo C.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados de Vissim, PTV.

Figura 3.16. Número de vehículos con sentido a Ciudad de México.

Las casetas que tienen el sentido hacia Querétaro tienen un comportamiento similar a la del sentido contrario, las casetas centrales tienen una tendencia de crecimiento partiendo del escenario uno hasta el escenario cinco. En la Figura 3.17, se puede observar el comportamiento del número de vehículos por caseta y escenario, en ésta se observa una sub-utilización en las casetas laterales, esto bajo el supuesto de que todas estén operando al mismo tiempo. Se puede observar que las casetas laterales I, II, III, IX, X y XI tienen un comportamiento decreciente lo que significa que entre mayor número de vehículos que pagan de forma automática estos son atendidos por los carriles centrales y por lo tanto teniendo una subutilización en las casetas laterales.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados de Vissim, PTV.

Figura 3.17. Porcentaje de ocupación de Casetas en sentido a Querétaro

3.9 Conclusiones

En este capítulo se presenta el desarrollo de un modelo de microsimulación para el análisis de colas de las casetas de peaje. Para desarrollar el modelo se requiere de considerables datos e información, como de la infraestructura, número de carriles, ancho carril, configuración de la plaza de cobro, señalamiento horizontal y vertical, velocidades de operación, volúmenes de tránsito y otros más, sin embargo, el software Vissim tiene datos predeterminados que se pueden utilizar y también permite valerse de medios alternos para poder desarrollarlo. Es importante la disponibilidad de datos relacionados al flujo de tránsito y de operación del sistema. En este ejemplo, se contó con información y recomendaciones de otros estudios para el desarrollo, calibración y validación del modelo.

La configuración de las casetas en cada sentido fue diferente, lo que permitió ver dos situaciones, una en donde hay un número reducido de casetas y el contrario en donde hay más casetas y con una configuración que permite tener medidas de desempeño muy inferiores.

En el caso de las casetas con sentido a la Ciudad de México, se observó que las medidas de desempeño, eran menores conforme se reducía la demanda de pago manual, sin embargo, al contar con casetas dedicadas a un pago automático y efectivo, se incrementaban los valores de las medidas de desempeño en comparación con el caso donde la demanda de pago en automático era del 75 por ciento, además de tener un mayor uso del suelo.

En el caso de contar con once casetas sin casetas dedicadas a un cobro en específico, las medidas de desempeño son sumamente bajas, llegando a tener subutilización de algunas casetas.

Hay una gran cantidad de variantes en un modelo de simulación, que con el uso de modelos de microsimulación se pueden evaluar. En este caso la principal variante es el tipo de pago en casetas, además, se pudo integrar, casetas exclusivas a un tipo de pago y una configuración diferente de casetas. Lo anterior permitió observar como varían las medidas de desempeño del modelo. Lo que lleva a concluir la gran ventaja en tiempos y costos de un modelo de microsimulación.

Conclusiones

Del desarrollo de este trabajo se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Se señala que el enfoque de simulación es mejor para representar las operaciones de una plaza de cobro ya que toma en cuenta aspectos que un análisis de colas ignora.
- El uso de un modelo de simulación, como el usado en el proyecto, al analizar un problema de transporte resulta menos costoso ya que no afecta las operaciones del sistema bajo estudio.
- En periodos de alta demanda, los vehículos que hacen cola para pagar en efectivo provocan retrasos que afectan tanto a los conductores que pagan efectivo como a aquellos que cuentan con dispositivos para el pago electrónico de las cuotas.
- La configuración actual, con los carriles exclusivos para el pago electrónico de peajes situados a la derecha, no aprovecha totalmente la ventaja del pago electrónico.
- El uso del pago electrónico de peajes aumenta la capacidad de la plaza, reduce los retrasos y la contaminación provocada por la disminución de la velocidad de los vehículos que circulan por las plazas de peaje.
- Al aumentar la capacidad de las plazas de cobro puede reducirse el número de casetas de cobro y con ello los costos asociados a la construcción, derecho de vía, mantenimiento y el personal necesario para operarlas.
- Una inversión relativamente baja en la implantación de un sistema de cobro electrónico de peajes puede dar lugar a una mejora sustantiva en el tiempo de servicio a los usuarios de las plazas de cobro de las autopistas de cuota. A mayor participación del peaje electrónico, menor es el tiempo perdido por los vehículos que transitan por la autopista.

Bibliografía

Abdelwahab, Hassan T. "Traffic micro-simulation model for design and operational analysis of barrier toll stations". Departamento de Obras Públicas, Colegio de Ingeniería de la Universidad del Cairo, Egipto. 2016.

Acha Daza, Jorge A. Determinación del Estado del Arte en el Cobro Electrónico de Cuotas. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 312, San Fandila, Qro., 2008.

Acha Daza, Jorge A. Telepeaje e Infoviaje en México. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 429, San Fandila, Qro., 2014.

Agosta, Roberto; González, Raúl y Suppor, Maria del Rosario. Experiencia de aplicación de modelos de transporte: simulación de tránsito urbano. 2019. Recuperado de <https://www.acyaglobal.com/wp/wp-content>.

Arlinda Alimehaj, Rrecaj& Bombol Kristi M. Calibration and Validation of the VISSIM Parameters - State of the Art. TEM Journal 4(3):255-269 TEM Journal – Volume 4 / Number 3 / 2015. 255. 2015. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/6f57/25bc6e14630d148c60ea5cb1660c794cbff4.pdf>

Casares Agustín y Galarraga Jorge. Calibración del modelo de seguimiento de VISSIM en carreteras multicarriles de Uruguay. XXIV Congreso Nacional de Pesquisa en Transporte de ANPET Ouro Prieto. 2015. Recuperado de http://146.164.5.73:20080/ssat/interface/content/anais_2015/TrabalhosFormatados/AC601.pdf.

Federal Highway Administration (FHWA) Traffic analysis toolbox Volume III: Guidelines for applying traffic microsimulation modeling software. Washington: FHWA-HRT-04-040. 2004. Recuperado de https://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat_vol3/list_contents.htm.

Federal Highway Administration (FHWA). Traffic analysis toolbox Volume III: Guidelines for applying traffic microsimulation modeling software. Washington: FHWA-HRT-04-040. 2019. Recuperado en <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop18036/index.htm>

Feldman, Olga. The geh measure and quality of the highway assignment models. Conference: European Transport Conference, At Glasgow. 2012 Recuperado en: https://www.researchgate.net/publication/263140653_THE_GEH_MEASURE_AND_QUALITY_OF_THE_HIGHWAY_ASSIGNMENT_MODELS.

Gutiérrez Hernández José Luis, Soria Anguiano Veronica Josefina y Casanova Zavala Wendy Alejandra. Análisis estadístico de la información recopilada para automóviles, en las estaciones instaladas en 2016. Documento Técnico No. 78, San Fandila, Qro., 2019.

Gutiérrez González Eduardo y Vladimirovna Panteleeva Olga. Estadística Inferencial 1 para Ingeniería y Ciencias. Editorial Patria S.A. de C.V. México. 2016.

Humphrey, T.F.; Kanaan, A.Y.; and Cunningham, R.F. "Implementation of Electronic Toll Collection and Traffic Management Systems in New England". Transportation Research Record 1359. Transportation Research Board, 1992.

Janson Olstam, Johan & Tapani, Andreas. comparison of car-following models. Transportforum, 2004, Linköping: VTI. Swedish National Road and Transport Research Institute. Swedish National Road Administration.

Modeling Toll Plaza Behavior Using Queuing Theory. <https://sites.math.washington.edu/~morrow/mcm/cary05.pdf>. Visto el 30 de noviembre de 2019.

Nezamuddin. "Developing Microscopic Toll Plaza Model Using Paramics". University of Central Florida, 2006.

Pérez Echeverría Víctor H. Evaluación del impacto económico y ambiental producido por congestionamiento en casetas de cobro en México, mediante técnicas de microsimulación. Tesis de Maestría de la Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Querétaro, 2018.

PTV VISION, (PTV). Documento Vissim Calibration Setting del Manual del Vissim 10. Año 2018. Recuperado de <https://wisconsin.gov/dtsdManuals/traffic-ops/manuals-and-standards/teops/16-20att6.3.pdf>.

PTV VISION, (PTV). Manual del Vissim 11. Año 2019.

Quevedo A, Moret AY, Jerez M. Comparación de métodos de ajuste de funciones de probabilidad para distribuciones diamétricas en plantaciones de Teca. - Revista Forestal Venezolana, 2003 - academia.edu URL <https://pdfs.semanticscholar.org/62ad/9792d18cfa6193c380fff14aacd9ee079f7f.pdf>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Corredores Económicos Interoceánicos Multimodales. Publicado de julio de 2016. Recuperado de <https://www.gob.mx/puertosymarinamercante/documentos/plataforma-logistica-de-talla-mundial>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. "Capacidad y niveles de servicio en la red de carreteras", 2017.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Dirección General de Servicios Técnicos. "Datos Viales", 2019.

Zúñiga Alarcón, Víctor I. Uso de herramientas de microsimulación para la definición de estrategias de control de tránsito para la ciudad de Santiago. Memoria para optar al título de ingeniero Civil. Universidad de Chile. 2010. Recuperado en http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103923/cf-zuniga_va.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Anexo A. Tiempos de atención en plazas de cobro

En este anexo se presenta el resultado del análisis estadístico y pruebas de bondad de ajuste para los datos de tiempo de atención en caseta.

Como se menciona en el apartado 3.4, se consideraron los datos de tiempo de atención en casetas del trabajo de Pérez (2018). Pérez realizó un levantamiento de datos de tiempo de atención. Los datos registran el tipo de pago (Manual o automático) y tipo de vehículo. En este último consideró: automóviles, autobuses, camiones de 2 ejes, camiones de 3 ejes, tractocamiones con 3 ejes y semirremolque con 2 ejes, tractocamiones con 3 ejes y semirremolque con 3 ejes y finalmente tractocamiones con semirremolque y remolque. Finalmente obtiene muestras por cada tipo de vehículo y forma de pago, cada muestra tiene 50 datos.

Para fines de este trabajo, se consideraron los siguientes tipos de vehículos: automóviles (A), autobuses (B), camiones (C) que integra a los camiones de 2 y 3 ejes, tractocamiones con semirremolque (TS) que suma a los tractocamiones con 3 ejes y semirremolque con 2 ejes y tractocamiones con 3 ejes y semirremolque con 3 ejes; y tractocamiones con semirremolque y remolque (TSR). Además, diferenciando cada uno por tipo de pago, manual o automático.

Se utiliza la prueba de bondad de ajuste Ji-cuadrada y la de Anderson Darling. El análisis se realizó con el programa de Excel y Minitab. En este Anexo, se presentan tablas de resultados, con los estadísticos calculados de las muestras y los esperados para cada una de las pruebas de bondad de ajuste. El proceso a detalle se puede consultar en Gutiérrez y Vladimirovna (2016).

Partiendo de la definición de las hipótesis estadísticas para establecer la procedencia de los datos:

H0 los datos x_1, x_2, \dots, x_n tienen una distribución f

H1 los datos x_1, x_2, \dots, x_n no tienen una distribución f

En el caso de la prueba Ji cuadrada se tiene la siguiente regla de decisión:

Rechazar H_0 : x 's tienen un comportamiento f , al nivel de significancia α , si

$$\chi_{cal}^2 > \chi_{m-k-1}^2 .$$

Donde:

α : es el nivel de significancia, para este trabajo fue del 5%.

$m-k-1$: son los grados de libertad, cuya área derecha sea igual a .

χ_{cal}^2 : El estadístico de prueba de la muestra

χ_{m-k-1}^2 : el valor de la distribución ji cuadrada con $m-k-1$ grados de libertad a un nivel de significancia .

La prueba Anderson-Darling (A-D) prueba que las observaciones provienen de una distribución acumulada F_0 .

En el caso de la prueba de bondad de ajuste de Anderson-Darling (A-D) se tiene la regla de decisión:

Rechazar H_0 : x 's tienen un comportamiento F_0 , al nivel de significancia α , sí $\rho < AD$.

Donde:

α : es el nivel de significancia

AD : El estadístico de la prueba A-D de las observaciones.

ρ : El estadístico calculado con AD a un nivel de significancia dado.

Cuadro A.1. Vehículos Tipo A Manual

	Ji Cuadrada		Anderson-Darling	
	χ^2_{cal}	χ^2_{m-k-l}	AD	ρ
Binomial	7.889	12.592		
Poisson	9.512	12.592		
Exponencial	96.746	12.592	13.935	< 0.003
Normal	11.053	11.071	0.059	0.118
<i>A_Manual</i>				
Media	7.71			
Error típico	0.26			
Mediana	7.50			
Moda	7.50			
Desviación estándar	1.83			
Varianza de la muestra	3.36			
Curtosis	-0.36			
Coefficiente de asimetría	0.57			
Rango	7.00			
Mínimo	5.00			
Máximo	12.00			
Suma	393.20			
Cuenta	51.00			
Nivel de confianza (95.0%)	0.52			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A.2. Vehículos Tipo B Manual

	Ji Cuadrada		Anderson-Darling	
	χ^2_{cal}	χ^2_{m-k-l}	AD	ρ
Binomial	12.032	12.592		
Poisson	14.548	12.592		
Exponencial	121.907	12.592	18.675	<0.003
Normal	48.689	11.071	1.092	0.007
<i>B Manual</i>				
Media	8.89			
Error típico	0.12			
Mediana	8.90			
Moda	9.70			
Desviación estándar	0.83			
Varianza de la muestra	0.69			
Curtosis	-1.11			
Coeficiente de asimetría	-0.41			
Rango	2.70			
Mínimo	7.30			
Máximo	10.00			
Suma	435.40			
Cuenta	49			
Nivel de confianza (95.0%)	0.24			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A.3. Vehículos Tipo C Manual

	Ji Cuadrada		Anderson-Darling	
	χ^2_{cal}	χ^2_{m-k-l}	AD	ρ
Binomial	20.936	15.507		
Poisson	15.410	15.507		
Exponencial	151.127	15.507	36.300	<0.003
Normal	89.180	14.067	1.572	< 0.005
<i>C2+C3 Manual</i>				
Media	8.77			
Error típico	0.12			
Mediana	8.90			
Moda	9.30			
Desviación estándar	0.9360			
Varianza de la muestra	0.88			
Curtosis	-1.08			
Coficiente de asimetría	-0.23			
Rango	7.10			
Mínimo	7.10			
Máximo	10.70			
Suma	868.20			
Cuenta	99.00			
Nivel de confianza (95.0%)	0.24			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A.4. Vehículos Tipo T-S Manual

	Ji Cuadrada		Anderson-Darling	
	χ^2_{cal}	χ^2_{m-k-l}	AD	ρ
Binomial	17.329	15.507		
Poisson	16.724	16.909		
Exponencial	182.716	16.909	30.254	<0.003
Normal	30.578	15.507	1.626	0.005
T3S2 + T3S3				
Media	10.87			
Error típico	0.21			
Mediana	10.65			
Moda	8.00			
Desviación estándar	2.15			
Varianza de la muestra	4.64			
Curtosis	-1.17			
Coficiente de asimetría	0.22			
Rango	7.70			
Mínimo	7.50			
Máximo	15.20			
Suma	1,109.00			
Cuenta	102.00			
Nivel de confianza (95.0%)	0.42			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A.5. Vehículos Tipo T-S-R Manual

	Ji Cuadrada		Anderson-Darling	
	χ^2_{cal}	χ^2_{m-k-l}	AD	ρ
Binomial	13.514	15.507		
Poisson	15.699	15.507		
Exponencial	156.197	15.507	16.083	<0.003
Normal	12.777	14.076	1.650	< 0.005
<i>T3S2R4 Manual</i>				
Media	12.23			
Error típico	0.28			
Mediana	12.75			
Moda	13.00			
Desviación estándar	1.82			
Varianza de la muestra	3.30			
Curtosis	-1.31			
Coefficiente de asimetría	-0.40			
Rango	8.10			
Mínimo	9.10			
Máximo	14.70			
Suma	587.20			
Cuenta	48.00			
Nivel de confianza (95.0%)	0.55			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A.6. Vehículos Tipo A Tag

	Ji Cuadrada		Anderson-Darling	
	χ^2_{cal}	χ^2_{m-k-l}	AD	ρ
Binomial	15.019	11.071		
Poisson	14.215	11.071		
Exponencial	10.996	11.071	14.086	<0.003
Normal	72.878	9.488	0.718	0.057
<u>A_Tag</u>				
Media	2.91			
Error típico	0.08			
Mediana	2.90			
Moda	3.80			
Desviación estándar	0.57			
Varianza de la muestra	0.32			
Curtosis	-1.16			
Coficiente de asimetría	0.10			
Rango	1.80			
Mínimo	2.00			
Máximo	3.80			
Suma	136.90			
Cuenta	47.00			
Nivel de confianza (95.0%)	0.17			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A.7. Vehículos Tipo B Tag

	Ji Cuadrada		Anderson-Darling	
	χ^2_{cal}	χ^2_{m-k-l}	AD	ρ
Binomial	20.603	12.592		
Poisson	14.668	12.592		
Exponencial	26.417	12.592	12.043	<0.003
Normal	50.435	11.071	1.396	< 0.005
<u>B _ Tag</u>				
Media	3.46			
Error típico	0.14			
Mediana	3.50			
Moda	4.60			
Desviación estándar	0.98			
Varianza de la muestra	0.97			
Curtosis	-1.47			
Coeficiente de asimetría	0.08			
Rango	2.90			
Mínimo	2.10			
Máximo	5.00			
Suma	176.40			
Cuenta	51.00			
Nivel de confianza (95.0%)	0.28			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A.8. Vehículos Tipo C Tag

	Ji Cuadrada		Anderson-Darling	
	χ^2_{cal}	χ^2_{m-k-l}	AD	ρ
Binomial	4,710.7	16.909		
Poisson	67.401	16.909		
Exponencial	40.788	16.909	27.450	<0.003
Normal	169.234	15.507	1.475	< 0.005
C2+C3_Tag				
Media		3.56		
Error típico		0.08		
Mediana		3.60		
Moda		3.00		
Desviación estándar		0.83		
Varianza de la muestra		0.68		
Curtosis		-1.16		
Coefficiente de asimetría		-0.16		
Rango		2.90		
Mínimo		2.00		
Máximo		4.90		
Suma		362.80		
Cuenta		102.00		
Nivel de confianza (95.0%)		0.16		

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A.9. Vehículos Tipo T-S Tag

	Ji Cuadrada		Anderson-Darling	
	χ^2_{cal}	χ^2_{m-k-l}	AD	ρ
Binomial	75.507	16.909		
Poisson	73.685	16.909		
Exponencial	23.657	16.909	26.368	<0.003
Normal	915.421	15.507	1.168	< 0.005
<i>T3S2+T3S3_Tag</i>				
Media	3.54			
Error típico	0.21			
Mediana	3.40			
Moda	4.50			
Desviación estándar	0.88			
Varianza de la muestra	0.77			
Curtosis	-1.17			
Coficiente de asimetría	0.04			
Rango	7.70			
Mínimo	2.00			
Máximo	5.00			
Suma	360.70			
Cuenta	102.00			
Nivel de confianza (95.0%)	0.42			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A.10. Vehículos Tipo T-S-R Tag

	Ji Cuadrada		Anderson-Darling	
	χ^2_{cal}	χ^2_{m-k-l}	AD	ρ
Binomial	17.18	11.0705		
Poisson	16.22	11.0705		
Exponencial	15.33	11.0705	13.08	<0.003
Normal	40.56	9.4877	1.086	0.007
T3S2R4 _Tag				
Media	3.26			
Error típico	0.12			
Mediana	3.00			
Moda	2.20			
Desviación estándar	0.85			
Varianza de la muestra	0.72			
Curtosis	-0.96			
Coficiente de asimetría	0.44			
Rango	3.00			
Mínimo	2.00			
Máximo	5.00			
Suma	166.20			
Cuenta	51.00			
Nivel de confianza (95.0%)	0.24			

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B. Dimensiones de los vehículos de la simulación

Cuadro B.1. Dimensiones de vehículos de la simulación

Tipo	Modelo	Largo mts.	Anch mts.o	Alto Mts.
Automóvil	1: Car - Volkswagen Golf	4.211	2.004	1.475
Automóvil	2: Car - Audi A4	4.610	1.949	1.437
Automóvil	3: Nissan Máxima 2008	5.069	2.155	1.492
Automóvil	4: Car - Peugeot 607	4.760	2.069	1.430
Automóvil	5: Car_Volvo_C30_2009	4.251	1.988	1.507
Automóvil	6: Camioneta 2008	5.411	2.326	1.738
Automóvil	7: SUV FORD 2008	4.437	2.036	1.776
Automóvil	8: Camioneta toyota 2007	4.629	2.028	2.072
Automóvil	9: Camioneta suburban 2007	5.447	2.348	1.918
Autobús	31: Bus_AASHTO_45	13.704	2.524	3.605
Camión	51: HGV - C3	10.215	2.496	3.927
Camión	52: HGV - C2	10.228	2.400	3.663
Tractocamion- Semiremolque- Remolque	53: HGV - T3S2	16.428	2.632	4.361
Tractocamion- Semiremolque- Remolque	55: HGV - T3S2R4	27.724	2.632	4.350

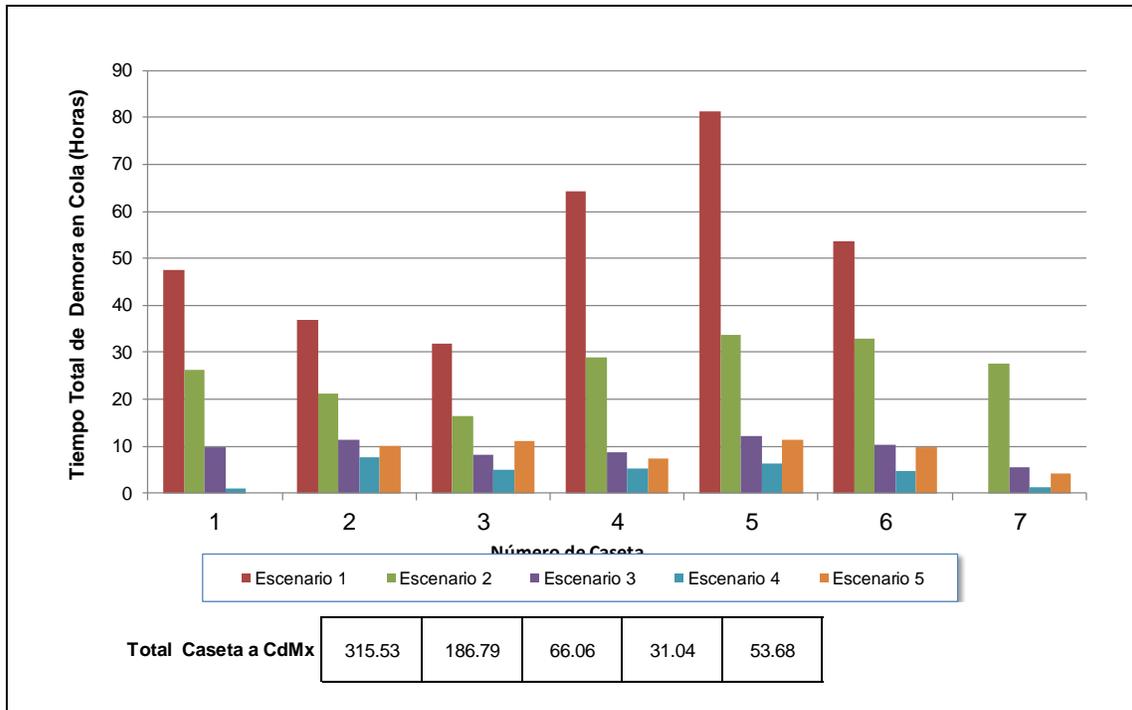
Fuente: Elaboración propia con base en resultados del software Vissim.

Anexo C. Resultados de la simulación

Cuadro C.1. Tiempo Promedio de Demora en Cola por vehículo (Mins)

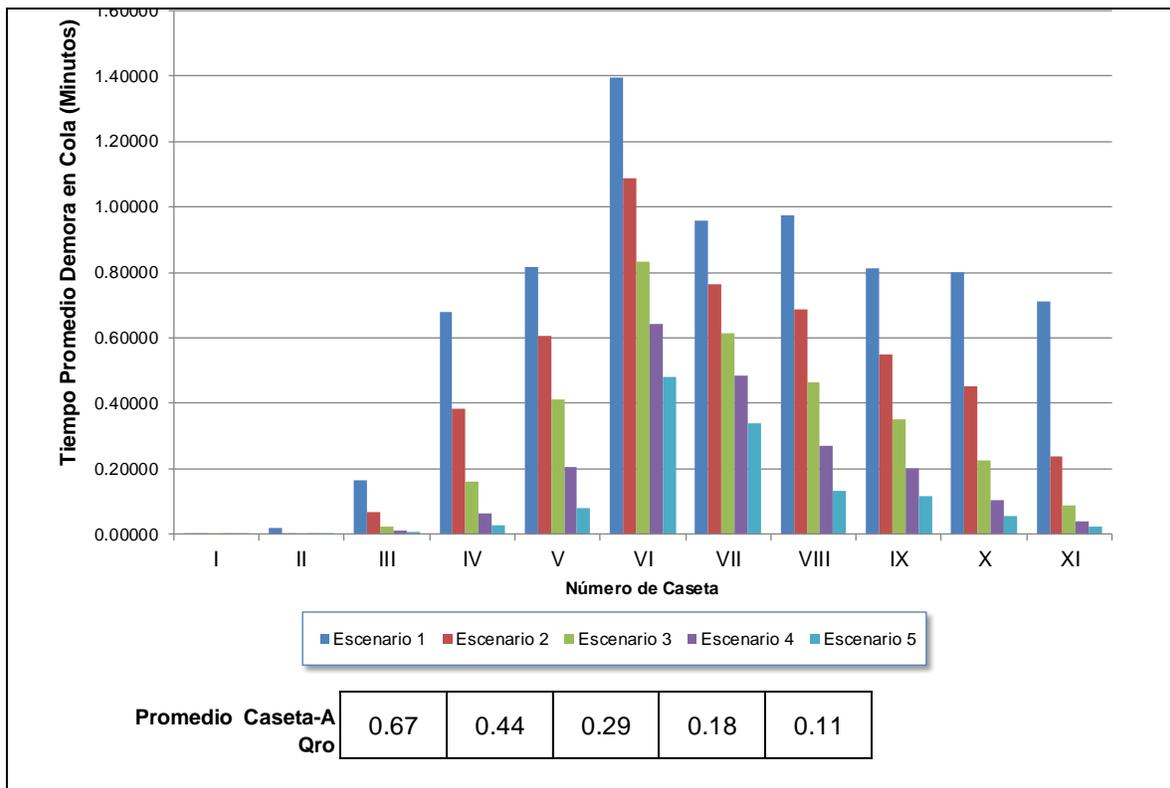
Casetas	Casetas	Escenario	Escenario	Escenario	Escenario	Escenario
		1	2	3	4	5
Casetas hacia CdMX	1	12.7	7.1	2.7	0.4	0.0
	2	11.9	5.7	2.4	1.5	2.4
	3	11.7	5.5	2.4	1.3	2.5
	4	17.6	8.0	2.2	1.2	1.5
	5	23.8	9.0	3.0	1.4	2.1
	6	25.3	8.8	2.7	1.1	2.0
	7	0.0	7.2	1.4	0.4	1.1
Promedio Caseta a CdMx		14.72	7.34	2.40	1.04	1.65
Casetas a Querétaro	I	0.00042	0.000	0.000	0.000	0.000
	II	0.018	0.004	0.0022	0.0004	0.0020
	III	0.164	0.067	0.024	0.011	0.005
	IV	0.680	0.385	0.161	0.063	0.026
	V	0.816	0.605	0.412	0.204	0.080
	VI	1.395	1.088	0.831	0.642	0.481
	VII	0.958	0.765	0.612	0.484	0.337
	VIII	0.972	0.685	0.465	0.272	0.132
	IX	0.814	0.548	0.349	0.199	0.116
	X	0.801	0.452	0.227	0.106	0.057
	XI	0.711	0.238	0.087	0.038	0.024
Promedio Caseta a Cd.Qro.		0.67	0.44	0.29	0.18	0.11

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del software Vissim.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del software Vissim.

Figura C.1 Tiempo Promedio Demora en cola en casetas con sentido a Ciudad de México (Mins)



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del software Vissim.

Figura C.2 Tiempo Total de demora en cola de las casetas con sentido a Querétaro (Minutos)

Cuadro C.2. Longitud promedio de colas en casetas de cobro de Palmillas

		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3 Caso Base	Escenario 4	Escenario 5
Casetas hacia CdMX	1	512	474	176	56	0
	2	512	474	182	115	198
	3	512	474	181	115	202
	4	512	474	181	115	200
	5	512	474	181	110	195
	6	512	474	183	108	193
	7	0	474	172	70	178
Casetas a Querétaro	I	51	42	31	18	9
	II	38	24	12	6	4
	III	7	3	2	1	1
	IV	1	0	0	0	0
	V	0	0	0	0	0
	VI	45	10	2	1	0
	VII	71	37	15	6	3
	VIII	82	55	34	18	11
	IX	84	58	35	18	8
	X	91	74	61	49	39
	XI	92	75	64	54	46

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del software Vissim.

Cuadro C.3. Variación porcentual de la longitud promedio de colas respecto al Caso Base

		Casetas de cobro de Palmillas (Mts)				
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3 Caso Base	Escenario 4	Escenario 5
Casetas hacia CdMX	1	190%	169%	243	-68%	-100%
	2	182%	161%	243	-36%	9%
	3	183%	162%	243	-36%	11%
	4	182%	161%	243	-37%	11%
	5	183%	162%	243	-40%	7%
	6	180%	160%	245	-41%	6%
	7	-100%	176%	244	-60%	4%
Casetas a Querétaro	I	66%	36%	29	-40%	-71%
	II	216%	98%	10	-49%	-70%
	III	365%	116%	1	-33%	-53%
	IV	148%	45%	0	-23%	-18%
	V	8%	10%	0	-48%	-55%
	VI	2069%	404%	2	-73%	-86%
	VII	374%	146%	13	-62%	-81%
	VIII	145%	64%	36	-46%	-66%
	IX	137%	65%	38	-48%	-77%
	X	49%	21%	62	-19%	-37%
	XI	44%	17%	64	-16%	-29%

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del software Vissim.

Cuadro C.4. Porcentaje promedio de ocupación de casetas

Casetas hacia CdMX	Caseta	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3 Caso Base	Escenario 4	Escenario 5
	1	82%	82%	80%	49%	0%
2	81%	78%	75%	73%	59%	
3	83%	81%	79%	77%	74%	
4	82%	80%	78%	76%	72%	
5	81%	80%	78%	75%	71%	
6	52%	80%	79%	76%	72%	
7	0%	77%	65%	50%	52%	
Promedio		66%	80%	76%	68%	57%

Casetas a Querétaro		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3 Caso Base	Escenario 4	Escenario 5
	I	0%	0%	0%	0%	0%
II	7%	5%	4%	3%	3%	
III	45%	34%	25%	20%	17%	
IV	81%	74%	65%	54%	44%	
V	83%	81%	78%	73%	62%	
VI	82%	80%	78%	76%	72%	
VII	82%	80%	79%	76%	73%	
VIII	82%	79%	75%	65%	52%	
IX	82%	79%	73%	65%	54%	
X	78%	66%	52%	36%	25%	
XI	53%	29%	15%	7%	4%	
Promedio		61%	55%	49%	43%	37%

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del software Vissim.



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>