

011685
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS DE EFICIENCIA Y GRADO DE UTILIZACION
DE CABINAS EN PLAZAS DE COBRO: CARRETERAS
MEXICO-CUERNAVACA, MEXICO-QUERETARO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA
(INVESTIGACION DE OPERACIONES)

P R E S E N T A :
MONTALVO ARCE TAMARA ALEJANDRA

DIRECTOR DE TESIS: DR. FRANCISCO VENEGAS MARTINEZ

MEXICO, D.F.

1999

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

275814



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**ANALISIS DE EFICIENCIA Y GRADO DE UTILIZACION
DE CABINAS EN PLAZAS DE COBRO: CARRETERAS
MEXICO-CUERNAVACA, MEXICO-QUERETARO.**

A LA MEMORIA DE:

OBDULIA SANCHEZ GUTIERREZ.

CELIA MORALES VEGA.

A CARLOS CON AMOR
GRACIAS POR TODO

INDICE

INTRODUCCION	1
I. ANTECEDENTES	
I.1 Evolución de la red carretera en la República Mexicana	3
I.2 Evolución vehicular en la República Mexicana	7
I.3 Clasificación de las carreteras	9
I.4 Las carreteras de cuota y concesionadas	10
II. OBJETIVO GENERAL	
II.1 Problemática	12
II.2 Sistema eficiente	13
III. CARACTERISTICAS DE LAS CARRETERAS MEXICO-CUERNAVACA, MEXICO-QUERETARO	
III.1 Carretera México-Cuernavaca	14
III.2 Carretera México-Querétaro	14
III.3 Estadísticas de las carreteras	15
III.3.1 Volúmenes	15
III.3.2 Tránsito vehicular mensual	17
III.3.3 Tránsito promedio diario	21
III.3.4 Variación horaria	25
III.3.5 Composición vehicular	34
III.3.6 Pronósticos del TDPA para las Plazas de Cobro	35
III.3.7 Factores de Corrección	36

IV. METODOLOGIA	
IV.1 Investigación de campo	37
IV.2 Análisis de la información existente	38
IV.3 Desarrollo del modelo	38
IV.4 Aplicación	39
V. LINEAS DE ESPERA	
V.1 Congestionamiento en Plazas de cobro	39
V.2 Problemas de espera	39
V.3 Objetivos de la Teoría de Colas	41
VI. MODELO	
VI.1 Prueba de Bondad de Ajuste	42
VI.2 Modelo una línea y múltiples servidores en paralelo	43
VI.3 Medidas de desempeño de estado estacionario	43
VI.4 Aplicación del modelo	45
VII. MODELO CON LLEGADAS POR BLOQUES	
VII.1 El tamaño del sistema en temporadas de salida en estado estacionario (La fórmula de Pollaczek-Khinchin)	47
VII.2 Distribución tiempo de espera	48
VII.3 El modelo $M^X/M/1$	50
CONCLUSIONES	51
ANEXOS	
ANEXO A: EL MODELO	56
ANEXO B: DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO	61
ANEXO C: RESULTADOS.....	63
REFERENCIAS	66

INTRODUCCION

El desarrollo industrial y turístico de México dependen en gran medida de su infraestructura carretera. Actualmente, se cuenta con más de 400,000 km de carreteras que comunican a casi todo el territorio nacional. Las carreteras de cuota México-Querétaro y México-Cuernavaca han jugado un papel predominante en el crecimiento económico de la zona. La administración de dichas carreteras considera: las necesidades de los diferentes usuarios; las particularidades y potencialidades de cada modo de transporte; la factibilidad y conveniencia de integración entre ellos; las características específicas del territorio que atraviesa y comunica; y los requerimientos que la actividad turística y comercial demanda del transporte.

La modernización del sistema de carreteras México-Querétaro, México-Cuernavaca conlleva a hacerlas más eficientes en sus servicios y a elevar la calidad de los mismos para sus usuarios. Un servicio que combine eficiencia y calidad debe ofrecer confiabilidad, seguridad, tiempos mínimos y responsabilidades definidas.

El problema que nos ocupa en este estudio es el tiempo de espera en la estación y cabinas de cobro que se traduce en altos costos de oportunidad para los usuarios.

El objetivo fundamental del estudio es el análisis de eficiencia y capacidad de uso en el diseño de sistemas de plazas de cobro de tal manera que las demoras causadas a los usuarios sean mínimas. En las temporadas de mayor demanda el flujo vehicular en las plazas de cobro se va tornando más ineficiente y con altos costos de oportunidad para particulares y transportistas.

El presente estudio utiliza un modelo de líneas de espera para examinar la eficiencia y el grado de utilización de las plazas de cobro de las carreteras México-Cuernavaca y México-Querétaro, así como proponer recomendaciones en materia de operación y manejo del número de cabinas.

En el capítulo I, se presenta la evolución de la red carretera y vehicular en la República Mexicana, las formas de clasificar una carretera y se da una descripción de las carreteras de cuota y concesionadas.

En el capítulo II, se describen los objetivos de este estudio, los cuales consisten en evaluar y modelar el comportamiento en la utilización de las plazas de cobro ubicadas en Tlalpan y Tepetzotlán, correspondientes a las autopistas México-Cuernavaca y México-Querétaro respectivamente. Para ello, se describe la problemática que se presenta en estas carreteras y las características que debe de tener un sistema de carreteras eficiente.

En el capítulo III, se enumeran las principales características de las carreteras México-Cuernavaca y México-Querétaro, se proporcionan algunas estadísticas sobre ellas, como han sido sus volúmenes de tránsito en los últimos años, su tránsito promedio mensual y la composición de los vehículos que por ellas transitan.

En el capítulo IV se desarrolla la metodología que se emplea en el presente estudio, que es la Teoría de Líneas de Espera y sus objetivos. Dentro de esta teoría se eligieron los modelos más apropiados al problema de estudio ¹.

Finalmente, se da una serie de conclusiones y recomendaciones del estudio realizado que permitirán incrementar la eficiencia y proporcionar un mejor servicio a los usuarios.

¹ En el anexo B se presenta una descripción gráfica del modelo, así como un diagrama de flujo.

I. ANTECEDENTES

I.1 EVOLUCION DE LA RED CARRETERA EN LA REPUBLICA MEXICANA

El sistema carretero nacional inició su desarrollo formalmente entre 1925 y 1930. Bajo el principio constitucional de libre tránsito, la red carretera comenzó a desarrollarse exclusivamente con recursos federales. El criterio de decisión para seleccionar las carreteras por construir era simple y efectivo: unir las ciudades y puertos más importantes del país. En este período se construyeron 1,420 km de carretera, consiguiendo que a través del automóvil y del camión quedara vinculado el 1% de nuestro territorio, el gasto incurrido en este proyecto fue de 54 millones de pesos a precios corrientes. Fueron tres las áreas que se comunicaron: la Ciudad de México con las ciudades de Pachuca, Puebla y Acapulco; la Ciudad de Mérida con el Puerto de Progreso y Valladolid, y por último Monterrey con Nuevo Laredo.

De 1931 a 1940 se incorporaron a la red 8,500 km, con lo cual quedaba comunicada por el automóvil y el camión el 9% del área de la República Mexicana, significando un coste de 227 millones de pesos a precios corrientes. La Ciudad de México es el punto de partida de la mayoría de los caminos construidos en esa década. Asimismo quedaban ligadas al territorio nacional cinco de las principales poblaciones fronterizas: Ciudad Juárez, Piedras Negras, Reynosa, Ciudad Victoria y Matamoros. En estos años el objetivo principal era integrar una red troncal que comunicara la capital del país con las capitales de los estados, con los principales puertos y aduanas fronterizas. En 1932 se inició la construcción de caminos en cooperación con los estados, mediante aportaciones financieras iguales de los gobiernos estatal y federal.

En la década de 1940 a 1950 se agregaron 12,530 km, alcanzando una red total de 22,450 km, logrando que el 17% del territorio del país quedara comunicado por el automóvil y el camión. Las obras realizadas en este lapso condujeron a una inversión de 1,726 millones de pesos a precios corrientes. Dos obras sobresalen en esta época: la terminación de la carretera Panamericana y la carretera México-Nogales. A pesar de los avances logrados, la red carretera no era suficiente para atender las necesidades del país, se requerían caminos vecinales y alimentadores a la red troncal que sirvieran para impulsar el desarrollo regional e incorporar a la vida nacional regiones incomunicadas.

En 1947 se comenzó la construcción de caminos vecinales por cooperación tripartita, en la que los particulares y gobiernos estatal y federal aportaban montos iguales para construir caminos. En 1949 nace la empresa Compañía Constructora del Sur encargada junto con el gobierno federal de construir los primeros caminos de cuota que marcarían

la pauta de la modernización carretera del país: la autopista México-Cuernavaca con un desarrollo de 62 km y la vía corta Amacuzac-Iguala con una longitud de 51 km.

Entre 1950 y 1960 se construyeron 22,440 km más de carretera, duplicándose la red existente de 1950, alcanzando una longitud total de 44,890 km, con ésta el 27% del territorio del país quedaba vinculado, con una inversión de 5,000 millones de pesos a precios corrientes. Así, durante esta década se impulsó la construcción de vías de importancia regional para los diversos sectores económicos, aunque obviamente sin dejar de extender la longitud de la aún incompleta red troncal. En 1952 se puso en operación la primera carretera de cuota.

Las carreteras de cuota son totalmente financiadas por el Gobierno Federal, quien en 1958 creó un organismo descentralizado llamado Caminos Federales de Ingresos al que se le asignaron entre otras, las funciones de administración de los caminos México-Cuernavaca, Cuernavaca-Amacuzac y Amacuzac-Iguala, las obras en proyecto del camino México-Querétaro y el puente sobre el Río Sinaloa, además de todos aquellos que se construyeran, con el objeto de efectuar una inversión recuperable mediante el cobro de cuota a los usuarios. La responsabilidad de administrar el puente sobre el Río Sinaloa, originó para el organismo una nueva asignación de funciones: los puentes de cuota. Esto determinó que en 1959 se modificara su denominación por el de Caminos y Puentes Federales de Ingresos.

De 1960 a 1970 se suman a la red carretera nacional 26,630 km más para culminar en 1970 con una longitud total de 71,520 km, logrando que el 31% del país quedara comunicado. La erogación que significó esta obra fue de 11,959 millones de pesos a precios corrientes. La mayor parte de los caminos troncales del país habían quedado terminados; esta década sobresale por la gran cantidad de caminos alimentadores y de interconexión con los troncales. En 1963 se crea Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE) y entre sus funciones ampliadas, se determina que deberá administrar servicios conexos a estas vías de comunicación, y los transbordadores que adquiriera en el futuro para el servicio marítimo y fluvial, así como establecer y administrar plantas elaboradoras de productos de pavimentación.

De 1970 a 1975 se agregaron a la red carretera 113,480 km, es decir, más del 150% de lo que había en 1970 para contar con una red total de 185,000 km, logrando que quedara comunicado el 57% del territorio del país. En la obra de estos cinco años destaca la carretera transpeninsular de Baja California y sus 6,000 km de caminos.

En 1983 la red carretera de México alcanzó los 213,238 km; de los cuales 44,340 km corresponden a carreteras federales y de cuota, 52,692 km pertenecen a carreteras de las redes estatales y vecinales, 84,709 km se identifican como caminos rurales y 31,497 km corresponden a brechas mejoradas.

La crisis económica sufrida por el país entre 1982 y 1988 afectó severamente a la infraestructura carretera e impidió su crecimiento, modernización y conservación, además

de que la Red Troncal redujera la calificación de su nivel de servicio. Surgió entonces la necesidad de diseñar esquemas financieros y jurídicos que permitiesen la modernización de la Red Vial mediante nuevas fuentes de financiamiento privado. De esta manera nace el concepto de las carreteras concesionadas.

Para 1994 la red carretera de México había alcanzado un total de 307,142 km de los cuales 48,960 km corresponden a carreteras federales y de cuota, 57,364 km corresponden a carreteras estatales y vecinales, 160,374 km se identifican como caminos rurales y 40,474 km corresponden a brechas mejoradas.

En la tabla y gráficas siguientes se observa la evolución de los kilómetros construidos en la red carretera de la República Mexicana, así como su incremento porcentual.

Años	Total (km)	Tasa de crecimiento (%)
1930	1,420	
1940	9,920	598.59
1950	22,450	126.31
1960	44,890	99.96
1970	71,520	59.32
1980	213,000	197.82
1983	213,238	0.11
1987	233,339	9.43
1990	239,235	2.53
1993	245,183	2.49
1996/p	312,148	27.31
1997/e	315,889	1.20

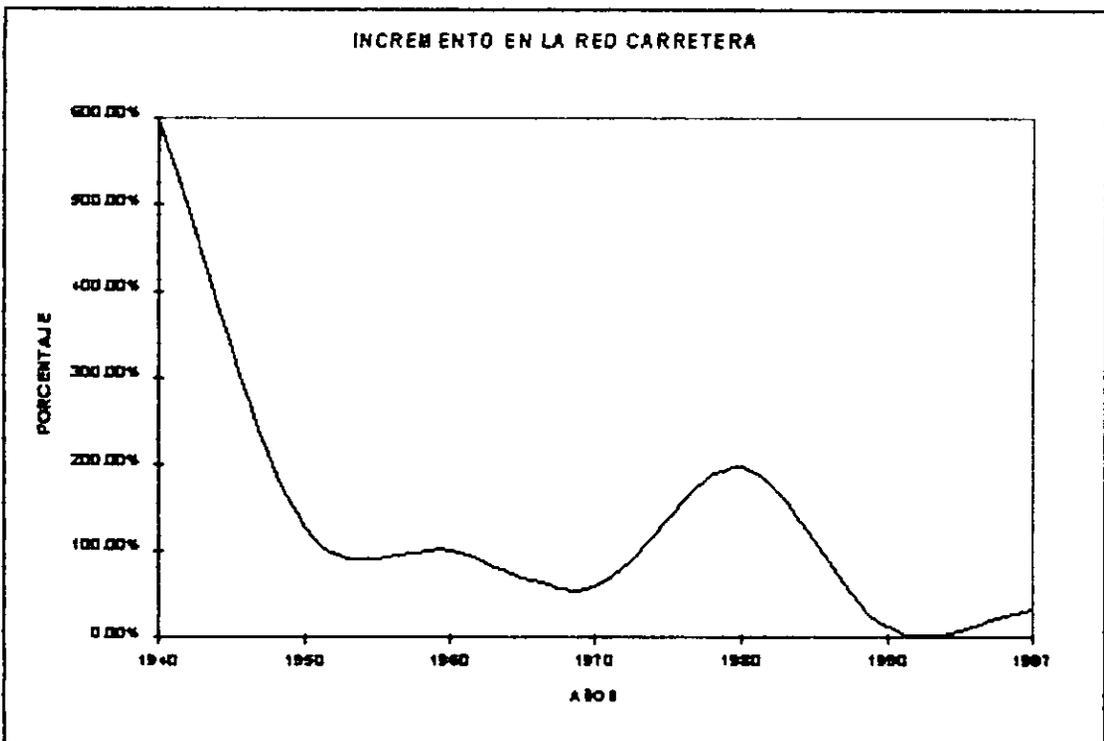
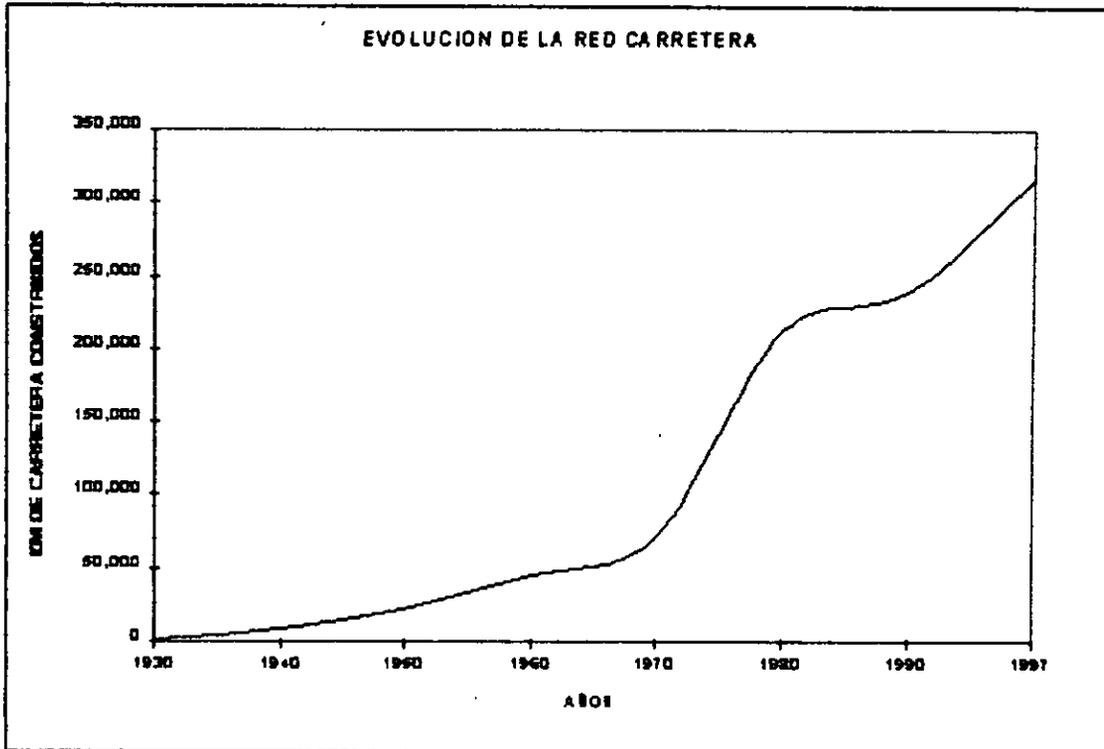
Fuente: Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos.

/p preliminar

/e estimado

Es importante señalar que durante 1994, CAPUFE tuvo una reducción en su infraestructura debido a que los caminos de la Delegación IV (México-Cuernavaca, la Pera-Cuautla, Puente de Ixtla-Iguala y Amacuzac-Taxco) se integraron al fideicomiso No. 921 "México-Cuernavaca" a partir del 11 de Agosto de 1996.

Caminos y Puentes dispone actualmente de una infraestructura propia conformada por 10 autopistas (898.9 km) y 29 puentes (9.9 km), de los cuales 12 son internacionales. Además, opera 9 autopistas concesionadas (579 km) y 6 puentes concesionados (6 km), que junto con otros 158 km de caminos contratados integran un total de 1,600 km y 35 puentes.



I.2 EVOLUCION VEHICULAR EN LA REPUBLICA MEXICANA

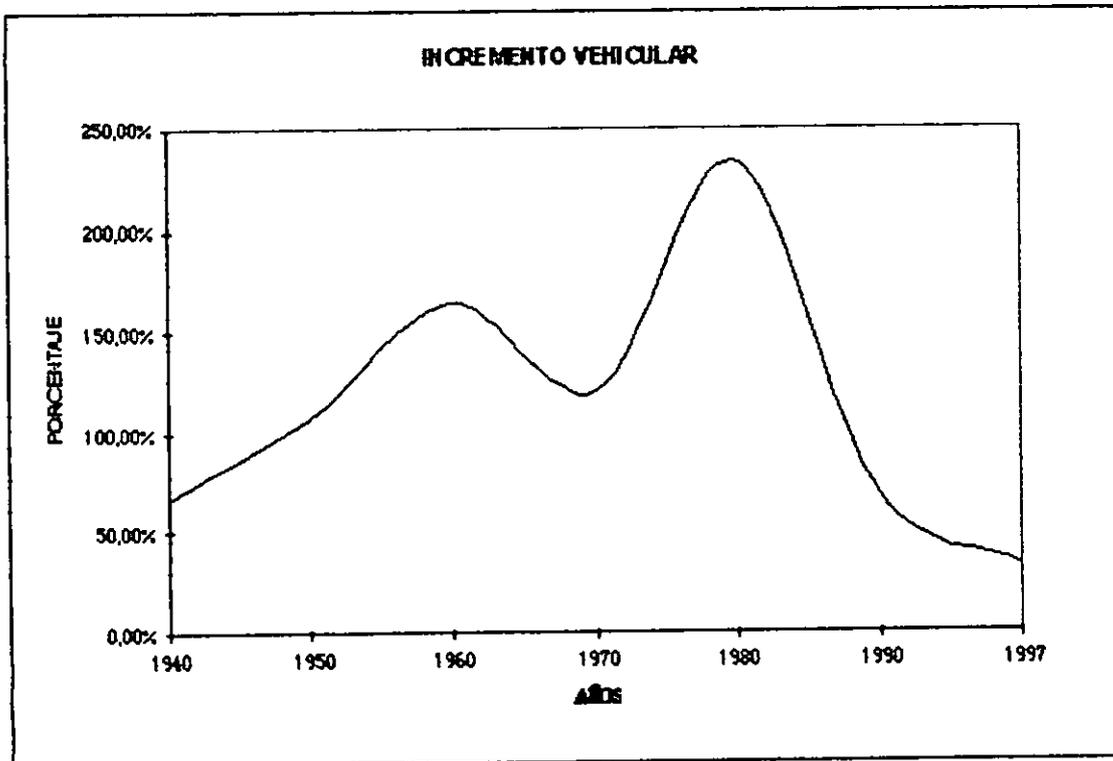
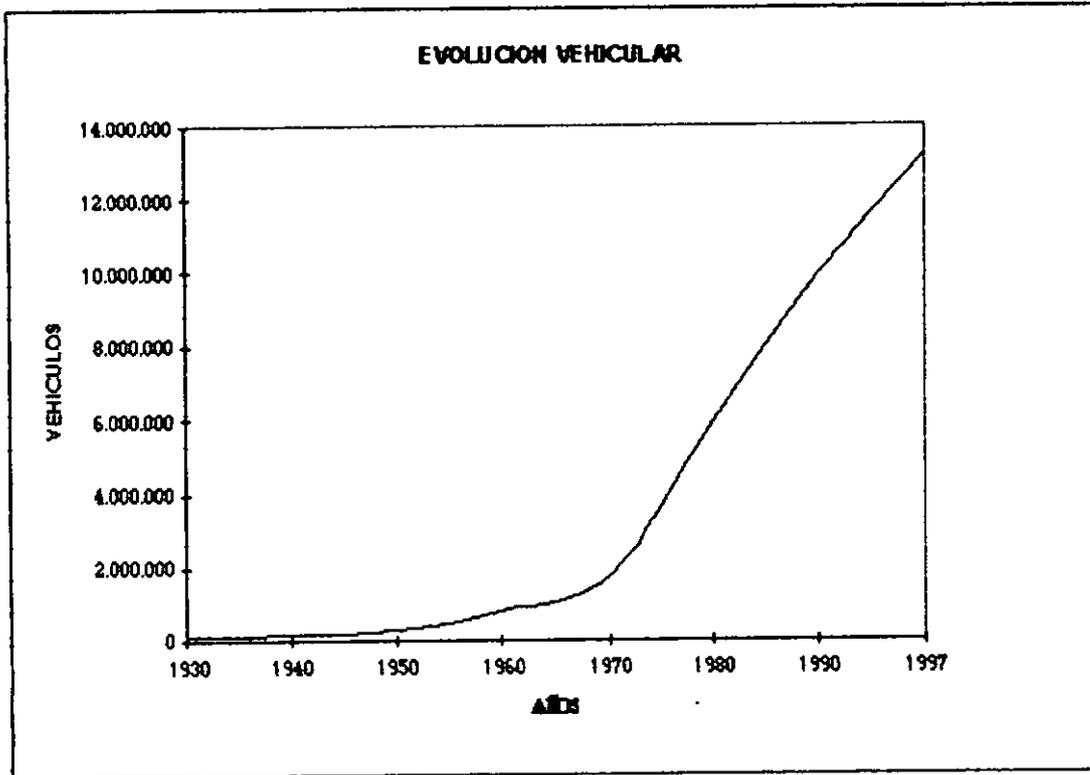
En 1898 entró a México el primer automóvil (auto francés de marca: Delaunay Belleville) y a partir de entonces el parque vehicular se ha incrementado, con el paso del tiempo, en forma rápida como lo muestran la tabla y gráfica siguientes:

Años	Vehículos	Tasa de crecimiento (%)
1898	1	
1924	42,858	
1930	87,665	104.55
1940	145,708	66.21
1950	302,798	107.81
1960	802,630	165.07
1970	1'773,868	121.01
1972	2'148,639	21.13
1979	5'683,484	164.52
1989	7'795,000	37.15
1992	11'352,430	45.64
1993	11'601,858	2.20
1994	12'045,016	3.82
1995	12'526,882	4.00
1996	12'817,526	2.32
1997	13'235,955	3.26

Fuente: Ingeniería de Tránsito, Cal y Cárdenas.

El parque vehicular de México a nivel mundial ocupa el décimo primer lugar en importancia al alcanzar durante 1995 los 12.53 millones de unidades.

El vehículo es un elemento importante que debe ser considerado al proyectar las vialidades y servicios. Sabemos que el tránsito se incrementa y se hace lento debido al mal estado de los caminos, siendo ésta una de las causas, por lo que el desarrollo contribuye enormemente a la introducción del cobro de cuotas, que permiten la construcción y conservación de estos caminos. El cobro de cuotas es común tanto en Europa como en otros países de Latinoamérica.



I.3 CLASIFICACION DE LAS CARRETERAS

Las carreteras se pueden clasificar dependiendo de la función que desempeñan, según su fuente de financiamiento o de operación, sus especificaciones geométricas, su superficie de rodamiento o su importancia.

Las carreteras se construyen de acuerdo a ciertos objetivos por los cuales cumplen con distintas funciones y provocan ciertos efectos, entre las que se encuentran:

- Las de función social. Se construyen con el fin de integrar las zonas de bajo potencial económico al resto del país, tomando en cuenta a los núcleos de población de cierta importancia. Se busca un cambio en el modo de vida de sus habitantes, al hacerles llegar beneficios tales como educación, salubridad, justicia, etc.
- Las de penetración económica. Su principal objetivo es el de romper la situación de autoconsumo e incorporar las zonas potencialmente productivas a la economía del mercado nacional. Establecen las bases para que se efectúen inversiones en otros sectores con el consecuente impacto económico y social para sus habitantes.
- Las de zonas desarrolladas. Tienen como beneficios directos ahorros en costo de tracción, ahorros en tiempos de recorrido y eliminación de pérdidas motivadas por el posible congestionamiento de las carreteras de la región.

A lo largo de la evolución de la red carretera han existido diferentes agentes que han financiado u operado los caminos, por lo que las carreteras se pueden clasificar en:

- Carreteras Federales. Son costeadas totalmente por el Gobierno Federal desde su construcción hasta su conservación.
- Carreteras Estatales. El Gobierno Federal coopera con un 50% del costo y el otro 50% el Gobierno Estatal.
- Caminos en Cooperación. La participación es tripartita (Federación, Estado y Particulares).
- Carreteras Paraestatales. Es una red privada que pertenece principalmente a Petróleos Mexicanos, a la Comisión Federal de Electricidad y a Caminos y Puentes Federales.
- Carreteras Concesionadas. Se constituyen con financiamiento de la iniciativa privada y en menor grado del Gobierno Federal. Su conservación corre a cargo de la iniciativa privada mientras que la reglamentación a cargo del Gobierno Federal.

Por sus especificaciones geométricas se clasifican en: Especiales, tipo A, tipo B, tipo C, tipo D y tipo E. Las especiales son aquellas que se proyectan para zonas determinadas y cuando se tiene la necesidad de movilizar un volumen de tránsito grande, dentro de este grupo se encuentran las autopistas que generalmente son de cuota. Por su superficie de rodamiento, las carreteras pueden ser: pavimentadas, revestidas, terracerías y brechas.

Por último, tenemos que por su importancia las carreteras se clasifican como:

- Troncales o primarias. Soportan grandes volúmenes de tráfico y se pueden considerar interestatales o de largo itinerario.
- Alimentadoras o secundarias. Son las que funcionan como tributarias de las troncales, y a su vez éstas tienen ramales de toda la región a la que dan servicio.
- Vecinales o terciarias. Son ramales de poco tránsito y bajas especificaciones, con acceso a las carreteras troncales o alimentadoras.

I.4 LAS CARRETERAS DE CUOTA Y CONCESIONADAS

En la década de los cincuenta se aplicaron, por vez primera en México, técnicas formales de planeación y con ello el reconocimiento del desequilibrio regional y sectorial que hacían factibles y necesarias tanto las carreteras de altas especificaciones geométricas y gran costo, como las de especificaciones modestas y bajo costo. Se decidió entonces construir una clase especial de carreteras que fuera conveniente al país, no atentaran contra el principio constitucional de libre tránsito y se pudieran recuperar los recursos invertidos. Así, en 1952 nacieron las carreteras de cuota. Al igual que todas las demás, las carreteras de cuota, deben justificarse económica, política y socialmente, lo que implica que deben ser rentables para el país. Incluso debe considerarse como su principal característica la de su uso voluntario, lo que significa que debe existir una opción alterna para los usuarios como el uso de una carretera libre entre los mismos puntos comunicados por la carretera de cuota. Asimismo, la carretera de cuota debe justificarse en términos de una mejor calidad de servicio, caracterizada a través de atributos tales como seguridad, comodidad, economía y conveniencia. De esa manera la cuota no se interpreta como peaje, sino como el pago por un servicio a través del cual el usuario tiene beneficios; al mismo tiempo que permite cubrir los costos de construcción y operación.

Los serios problemas económicos que se manifestaron en la década de los ochenta, provocaron una reducción considerable en la inversión pública por parte del gobierno, de la que el sector carretero era una parte importante; ocasionando la necesidad de diseñar esquemas financieros y jurídicos que permitiesen y alentasen el uso de recursos privados en el sector. Como resultado de lo anterior se creó el concepto de las carreteras concesionadas. Desde el punto de vista del usuario, las carreteras concesionadas coinciden en varios aspectos con las de cuota; para utilizarlas se requiere hacer un pago y deben cumplir con criterios de rentabilidad para el país. Sin embargo, la diferencia es que los recursos para construirlas ya no provienen en su totalidad del gobierno, sino también de la iniciativa privada. En consecuencia se rigen por un marco jurídico diferente llamado concesión, mediante el cual la carretera es administrada por los concesionarios, no por CAPUFE, durante un período determinado por la recuperación de la inversión.

La administración de las carreteras es sin duda una actividad compleja, ya que involucra a distintos actores tales como transportistas, usuarios, autoridades, auxiliares y prestadores de servicios, cada uno de ellos con necesidades e intereses diferentes. Asimismo, la administración toma en cuenta muchas funciones como son: comunicación, integración, traslado de bienes y personas –entre otras. Para su ejecución requiere de múltiples tareas, entre las cuales se encuentran la planeación, la organización, el diseño, la construcción, el mantenimiento, la conservación, el control de operación, etc.

La organización del sistema carretero debe considerar las necesidades y posibilidades de los distintos actores, las particularidades y potencialidades de cada carretera, la factibilidad y conveniencia de integración entre ellas, las características geográficas del territorio que atraviesa y comunica, los volúmenes de intercambio que realizan, así como los requerimientos que la actividad comercial actual demanda de la red carretera.

II. OBJETIVO GENERAL

El objetivo del estudio es desarrollar una metodología que permita evaluar la capacidad de operación actual de las plazas de cobro de la red carretera mexicana. Para modelar el comportamiento de las plazas de cobro se utilizarán en particular las características y volúmenes de tránsito de las plazas de cobro de Tlalpan y Tepotzotlán que corresponden a las autopistas México-Cuernavaca y México-Querétaro, respectivamente.

Se utilizará un modelo de líneas de espera determinado por los parámetros que arroje la investigación de campo de ambas plazas. Una vez que se haya establecido la metodología y aplicado el modelo se podrán conocer los grados de utilización de las plazas de cobro, su nivel de servicio (rapidez), sus características de operación y su probable ampliación. Finalmente se propondrán recomendaciones para eficientar el uso de los servidores en las cabinas.

II.1 PROBLEMATICA

Los sistemas carreteros ofrecen a las ciudades el traslado de individuos y mercancías entre ellas, por medio de servicios de transporte los cuales se han incrementado con el paso del tiempo. Para satisfacer dichos incrementos de demanda de servicios de transporte, ya sea para tránsito de vehículos livianos, tránsito comercial, transporte público, etc., la mayor parte de las veces, los sistemas carreteros tienen que operar por arriba de su capacidad, originando problemas de tránsito.

Las carreteras México-Cuernavaca y México-Querétaro tienen volúmenes de tránsito superiores a otras carreteras porque ofrecen ciertas satisfacciones y oportunidades para sus usuarios, tales como, concentración de lugares de comercio, lugares de recreación, proximidad con la Ciudad de México, etc. Con el correspondiente incremento de los volúmenes de tránsito que se han registrado en dichas carreteras se ha generado la duda de saber si la capacidad actual de operación de las plazas de cobro es la adecuada para soportar dichos volúmenes de tránsito o determinar si los problemas de saturación en las plazas de cobro sólo se observan en los períodos de máxima demanda (fin de semana, vacaciones, puentes, etc.), los cuales ocasionan largas líneas de espera que se traducen en costos de oportunidad para los usuarios.

II.2 SISTEMA EFICIENTE

La modernización del sistema carretero conlleva a incrementar la eficiencia en sus servicios y a elevar la calidad de los mismos a fin de apoyar la economía del país. Las carreteras deben ser negocios financieramente sanos que estimulen la presencia de nuevos participantes en el sistema, para lo cual se deberá reestructurar tarifas, modificar y eficientar el servicio de las plazas de cobro, monitorear y cuantificar los flujos vehiculares, etc.

Para alcanzar un grado mayor de calidad en el servicio de las carreteras deben cumplirse las siguientes condiciones:

- **Confiabilidad del servicio.** El usuario prefiere un camino que le garantice seguridad, comodidad, y tiempos de recorrido mínimos.
- **Oportunidad del servicio.** El usuario requiere servicios que satisfagan sus demandas en el momento preciso en que se presente la necesidad.
- **Seguridad.** El usuario busca disminuir la probabilidad de daños en su persona, en su vehículo y/o en sus mercancías.
- **Tiempo de servicio.** El usuario elegirá aquellos caminos que le proporcionen llegar a su destino en el menor tiempo posible, por lo tanto preferirá opciones más rápidas.
- **Costo de servicio.** El usuario estará de acuerdo en pagar el costo del servicio siempre y cuando obtenga mejores oportunidades de traslado, así como la calidad de servicio.
- **Responsabilidades definidas.** El usuario desea tener un seguro que lo proteja en su persona durante su recorrido, así como el uso de la asistencia en el camino para la atención de fallas mecánicas.
- **Opciones alternas.** El usuario desea tener una manera alterna de pago del costo del servicio, sin necesidad de pagar en efectivo.

III. CARACTERISTICAS DE LAS CARRETERAS MEXICO-CUERNAVACA, MEXICO-QUERETARO

III.1 CARRETERA MEXICO-CUERNAVACA

El 30 de noviembre de 1952 se inauguró el camino de cuota entre México y Cuernavaca, con 61.540 km. de longitud, el cual principia en el km. 18.968 y termina en el 80.500. A partir del 11 de Agosto de 1994 esta carretera se concesionó y forma parte de la red contratada operada por CAPUFE. En esta carretera se ubican dos plazas de cobro que se describen a continuación.

PLAZA DE COBRO	CABINAS DE COBRO	LONGITUD DE CUOTA (KM)	UBICACION LUGAR	KM
Tlalpan	13	61.540	Tlalpan, D.F.	23.360
Tres Marías (C-M)	2	34.000	Tres Marías, Mor.	53.000
Tres Marías (M-C)	2	27.540	Tres Marías, Mor.	53.000

Fuente: Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos.

III.2 CARRETERA MEXICO-QUERETARO

La carretera México-Querétaro inaugurada el primero de octubre de 1958 se construyó con una longitud total de 115.142 km, cuenta con un camino de cuota que principia en el kilómetro 32.858 y termina en el 148.000. Esta carretera es operada por CAPUFE y forma parte de la red propia. En esta carretera se encuentran ubicadas cuatro plazas de cobro con las siguientes características:

PLAZA DE COBRO	CABINAS DE COBRO	LONGITUD DE CUOTA (KM)	UBICACION LUGAR	KM
Tepotzotlán	13	57.571	Tepotzotlán, Mex.	43.010
Jorobas	2	34.149	Huehuetoca, Mex.	56.280
Polotitlán	4	44.704	Polotitlán, Mex.	133.050
Palmillas	11	57.571	Palmillas, Qro.	147.917

Fuente: Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos.

III.3 ESTADISTICAS DE LAS CARRETERAS

En una carretera, la selección del tipo de vialidad, las intersecciones, los accesos y los servicios, dependen fundamentalmente del volumen de tránsito o demanda que circulará durante un intervalo de tiempo dado, de su variación, de su tasa de crecimiento y de su composición. Los errores que se cometan en la medición de estas estadísticas, ocasionará que la carretera funcione durante el período del proyecto, bien con volúmenes de tránsito iguales o inferiores a aquellos para los que se proyectó, o mal con problemas de congestión por volúmenes de tránsito superiores a los proyectados.

Con el fin de contar con los datos que sirvan de insumo para el desarrollo del modelo se analizará la información existente editada por CAPUFE, correspondiente al período 1993-1996, con la cual se identificarán los períodos de máxima demanda contenidos en días laborales y de fin de semana.

III.3.1 VOLUMENES

Se define volumen de tránsito como el número de vehículos que pasa por un punto a lo largo de una carretera o de un carril durante una unidad de tiempo determinado. La cantidad de flujo de tránsito, el volumen, se mide normalmente en unidades de vehículos por día, vehículos por hora, vehículos por minuto, etc.

Dos son las medidas de volumen de tránsito que son especiales para la ingeniería de carreteras: el tránsito promedio diario anual (TPDA) y el volumen horario máximo (VHM). El tránsito promedio diario anual es el número de vehículos que pasan por un punto particular en una carretera durante un período de 24 horas consecutivas durante un año.

Al igual que muchos sistemas dinámicos, los medios físicos y estáticos del tránsito, tales como las carreteras, están sujetos a ser solicitados y cargados por volúmenes de tránsito, los cuales poseen características espaciales (ocupan un lugar) y temporales (consumen tiempo). Las distribuciones espaciales de los volúmenes de tránsito generalmente resultan del deseo de la gente de efectuar viajes entre determinados orígenes y destinos, llenando así una serie de satisfacciones y oportunidades ofrecidas por el medio ambiente circundante. Las distribuciones temporales de los volúmenes de tránsito son el producto de los estilos y formas de vida que hacen que las gentes sigan determinados patrones de viaje basados en el tiempo, realizando sus desplazamientos durante ciertas épocas del año, en determinados días de la semana o en horas específicas del día ².

² Cal y Mayor y Cárdenas (1994).

Los volúmenes de tránsito siempre deben ser considerados como dinámicos, por lo que solamente son precisos para el período de duración de los aforos; sus variaciones son generalmente rítmicas y repetitivas. Por lo tanto, es fundamental conocer las variaciones periódicas de los volúmenes de tránsito dentro de las horas de máxima demanda, en las horas del día, en los días de la semana.

En las siguientes tablas se muestran los volúmenes de tránsito que se registraron en las plazas de cobro Tlalpan y Tepotzotlán de las carreteras México-Cuernavaca y México-Querétaro respectivamente en los últimos años. En donde se puede apreciar el peso relativo que tiene el tránsito urbano en la utilización de las carreteras cuando éstas se aproximan a la capital del país.

VOLUMENES DE TRANSITO

Años	México-Cuernavaca	Tlalpan.
1992	8,106,619	8,068,957
1993	8,679,579	8,500,127
1994	11,833,150	9,046,535
1995	8,112,554	7,854,668
1996	7,934,358	7,665,083

Fuente: CAPUFE.

VOLUMENES DE TRANSITO

Años	México-Querétaro	Tepotzotlán.
1992	17,669,886	10,022,470
1993	17,745,869	10,246,635
1994	18,388,445	10,785,993
1995	16,982,317	9,912,463
1996	18,066,995	10,397,741

Fuente: CAPUFE.

III.3.2 TRANSITO VEHICULAR MENSUAL

El tránsito mensual es el número total de vehículos que pasan durante un mes. Vale la pena mencionar, con referencia a la variación diaria de los volúmenes de tránsito tanto a nivel urbano como rural, que se presentan máximos en aquellos días de eventos especiales como Semana Santa, Verano y Fin de Año. A continuación se presentan tablas y gráficas donde se muestra el tránsito mensual de las carreteras México-Cuernavaca y México-Querétaro, así como, de las plazas de cobro Tlalpan y Tepotzotlán.

Como se observará en la plaza de cobro de Tlalpan en 1993 los meses de mayor volumen de tránsito fueron abril, agosto y diciembre acumulando un 28 por ciento del total de vehículos que transitó en ese año, para 1994 los meses fueron marzo, julio y diciembre sumando el 26.7 por ciento y para 1995 y 1996 los meses fueron marzo, abril y diciembre acumulando respectivamente el 28 por ciento del total de vehículos que circuló en cada año. Con lo anterior se confirma que los meses de máxima demanda coinciden con las vacaciones de Semana Santa, Verano y Navidad.

En el caso de la plaza de cobro de Tepotzotlán en los años 1993, 1994 y 1996 los meses que presentaron un volumen de tránsito mayor fueron julio, agosto y diciembre, acumulando en cada año un 27 por ciento del total de vehículos que transitó durante el año, siendo los meses donde se presentaron las vacaciones de Verano y Navidad, y para 1995 los meses fueron enero, abril y diciembre sumando un 27.3 por ciento del volumen total del año y estos meses coincidieron con las vacaciones de Semana Santa y Fin de Año.

Las gráficas nos permitirán visualizar de manera general el comportamiento del tránsito vehicular en las plazas de cobro durante los meses del año, el período analizado fue de 1993 a 1996.

Para Tlalpan podemos decir que en los cuatro años de estudio su comportamiento fue similar, presentándose el mayor tránsito vehicular como ya se mencionó en los meses de marzo, abril, julio, agosto y diciembre, asimismo se nota una tendencia baja en los meses de febrero, junio, septiembre y octubre.

Para Tepotzotlán en todo el período fue parecido su comportamiento, siendo los meses de tendencia alta julio, agosto y diciembre y los de tendencia baja febrero, junio y septiembre.

TRANSITO VEHICULAR MENSUAL 1993

MESES	MEXICO	TLALPAN	MEXICO	TEPOTZOTLAN
	CUERNAVACA		QUERETARO	
ENERO	696,951	685,152	1,445,931	811,564
FEBRERO	655,040	643,057	1,314,032	747,734
MARZO	685,106	672,699	1,410,313	812,781
ABRIL	775,055	762,939	1,563,745	886,375
MAYO	692,401	676,310	1,421,459	818,617
JUNIO	624,512	610,405	1,366,506	798,593
JULIO	735,818	718,536	1,581,965	915,994
AGOSTO	805,733	787,263	1,603,080	935,626
SEPTIEMBRE	678,843	663,893	1,362,339	800,809
OCTUBRE	752,648	736,152	1,487,431	873,606
NOVIEMBRE	727,952	711,273	1,425,126	839,101
DICIEMBRE	849,520	832,448	1,763,942	1,005,835
TOTAL	8,679,579	8,500,127	17,745,869	10,246,635

TRANSITO VEHICULAR MENSUAL 1994

MESES	MEXICO	TLALPAN	MEXICO	TEPOTZOTLAN
	CUERNAVACA		QUERETARO	
ENERO	747,173	731,198	1,483,397	851,464
FEBRERO	702,388	685,645	1,351,814	795,139
MARZO	880,251	860,852	1,527,707	901,595
ABRIL	806,649	789,634	1,452,663	842,882
MAYO	746,882	731,083	1,473,939	856,596
JUNIO	652,823	639,896	1,403,678	836,857
JULIO	834,910	818,912	1,646,651	982,798
AGOSTO	1,190,172	794,654	1,626,167	974,334
SEPTIEMBRE	1,247,025	705,691	1,498,267	878,976
OCTUBRE	1,303,618	742,307	1,579,440	927,363
NOVIEMBRE	1,254,603	713,791	1,521,718	888,240
DICIEMBRE	1,466,656	832,872	1,823,004	1,049,749
TOTAL	11,833,150	9,046,535	18,388,445	10,785,993

TRANSITO VEHICULAR MENSUAL 1995

MESES	MEXICO	TLALPAN	MEXICO	TEPOTZOTLAN
	CUERNAVACA		QUERETARO	
ENERO	720,904	695,784	1,496,510	879,984
FEBRERO	668,938	643,110	1,336,303	788,513
MARZO	726,690	700,178	1,404,755	828,522
ABRIL	845,746	820,376	1,511,038	886,709
MAYO	660,911	639,616	1,346,545	792,174
JUNIO	579,010	561,116	1,240,413	722,810
JULIO	666,403,	646,243	1,390,540	808,596
AGOSTO	681,018	661,920	1,482,629	856,668
SEPTIEMBRE	583,300	565,954	1,325,277	773,426
OCTUBRE	599,012	580,145	1,376,338	801,722
NOVIEMBRE	637,309	617,883	1,392,561	807,430
DICIEMBRE	743,313	722,343	1,679,408	965,909
TOTAL	8,112,554	7,854,668	16,982,317	9,912,463

TRANSITO VEHICULAR MENSUAL 1996

MESES	MEXICO	TLALPAN	MEXICO	TEPOTZOTLAN
	CUERNAVACA		QUERETARO	
ENERO	622,108	602,361	1,381,867	785,077
FEBRERO	644,295	622,443	1,349,424	775,188
MARZO	728,073	703,882	1,464,125	847,199
ABRIL	764,572	740,255	1,532,492	885,457
MAYO	633,310	610,328	1,460,415	845,397
JUNIO	604,532	583,164	1,404,519	813,887
JULIO	675,940	653,243	1,569,575	901,796
AGOSTO	704,978	681,379	1,618,334	926,587
SEPTIEMBRE	609,356	587,845	1,461,943	844,367
OCTUBRE	577,026	556,022	1,498,717	861,375
NOVIEMBRE	633,549	611,280	1,526,663	881,519
DICIEMBRE	736,619	712,881	1,798,921	1,029,892
TOTAL	7,934,358	7,665,083	18,066,995	10,397,741

III.3.3 TRANSITO PROMEDIO DIARIO

El tránsito promedio diario (TPD) es una medida fundamental que se utiliza para determinar los kilómetros-vehículo recorridos en las diferentes categorías de los sistemas de carreteras urbanas y rurales. Se define al tránsito promedio diario (TPD), como el número total de vehículos que pasan durante un período dado (en días completos) igual o menor a un año y mayor que un día, dividido entre el número de días del período.

En general, se puede decir que el tránsito en las carreteras urbanas se caracteriza por picos pronunciados durante las primeras horas de la mañana y las últimas de la tarde debido principalmente a los flujos de entrada y salida de los empleados, los máximos no ocurren durante los fines de semana y es común que el flujo menor tenga lugar los domingos. En las carreteras rurales, los máximos diarios son menos pronunciados, pero en los fines de semana y en la temporada vacacional, el flujo de tránsito se vuelve más denso debido a los viajes de turismo.

TRANSITO PROMEDIO DIARIO 1993

MESES	MEXICO	TLALPAN	MEXICO	TEPOTZOTLAN
	CUERNAVACA		QUERETARO	
ENERO	22,482	22,102	46,643	26,179
FEBRERO	23,394	22,966	46,930	26,705
MARZO	22,100	21,700	45,494	26,219
ABRIL	25,835	25,431	52,125	29,546
MAYO	22,336	21,816	45,834	26,407
JUNIO	20,817	20,347	45,550	26,620
JULIO	23,736	23,179	51,031	29,548
AGOSTO	25,991	25,396	51,712	30,181
SEPTIEMBRE	22,628	22,130	45,411	26,694
OCTUBRE	24,279	23,747	47,982	28,181
NOVIEMBRE	24,265	23,709	47,504	27,970
DICIEMBRE	27,404	26,853	56,901	32,446
PROM. ANUAL	23,780	23,288	48,619	28,073

TRANSITO PROMEDIO DIARIO 1994

MESES	MEXICO	TLALPAN	MEXICO	TEPOTZOTLAN
	CUERNAVACA		QUERETARO	
ENERO	24,102	23,587	47,852	27,467
FEBRERO	25,085	24,487	48,279	28,398
MARZO	28,395	27,769	49,281	29,084
ABRIL	26,888	26,321	48,422	28,096
MAYO	24,093	23,583	47,546	27,632
JUNIO	21,761	21,330	46,789	27,895
JULIO	26,933	26,417	53,118	31,703
AGOSTO	26,119	25,630	52,457	31,430
SEPTIEMBRE			49,942	29,299
OCTUBRE			50,950	29,915
NOVIEMBRE			50,724	29,608
DICIEMBRE			58,807	33,863
PROM. ANUAL	25,371	24,836	50,379	29,551

TRANSITO PROMEDIO DIARIO 1995

MESES	MEXICO	TLALPAN	MEXICO	TEPOTZOTLAN
	CUERNAVACA		QUERETARO	
ENERO	24,030	23,193	48,275	28,387
FEBRERO	22,298	21,437	47,725	28,161
MARZO	24,223	23,339	45,315	26,727
ABRIL	28,192	27,346	50,368	29,557
MAYO	22,030	21,321	43,437	25,554
JUNIO	19,300	18,704	41,347	24,094
JULIO	22,213	21,541	44,856	26,084
AGOSTO	22,701	22,064	47,827	27,634
SEPTIEMBRE	19,443	18,865	44,176	25,781
OCTUBRE	19,967	19,505	44,398	25,862
NOVIEMBRE	21,244	20,596	46,419	26,914
DICIEMBRE	24,777	24,078	54,174	31,158
PROM. ANUAL	22,535	21,832	46,527	27,157

TRANSITO PROMEDIO DIARIO 1996

MESES	MEXICO	TLALPAN	MEXICO	TEPOTZOTLAN
	CUERNAVACA		QUERETARO	
ENERO	20,737	20,079	44,576	25,325
FEBRERO	21,477	20,748	46,532	26,731
MARZO	24,269	23,463	47,230	27,329
ABRIL	25,486	24,675	51,083	29,515
MAYO	21,110	20,344	47,110	27,271
JUNIO	20,151	19,439	46,817	27,130
JULIO	22,531	21,775	50,631	29,090
AGOSTO	23,499	22,713	52,204	29,890
SEPTIEMBRE	20,312	19,595	47,159	27,238
OCTUBRE	19,234	18,534	48,346	27,786
NOVIEMBRE	21,118	20,376	50,889	29,384
DICIEMBRE	24,554	23,763	50,889	29,384
PROM. ANUAL	22,040	21,292	49,363	28,409

DIAS DE MAYOR TRANSITO VEHICULAR
CASETA TLALPAN

1993

1994

MES	DIA	VEHICULO	DIA	VEHICULO
ENERO	02	36,915	02	38,930
FEBRERO	07	37,889	06	38,561
MARZO	07	36,115	21	47,404
ABRIL	10	41,928	03	49,773
MAYO	01	31,469	08	36,128
JUNIO	20	32,565	05	34,403
JULIO	17	33,870	31	41,503
AGOSTO*	01	38,938	-	-
SEPTIEMBRE	19	39,712	-	-
OCTUBRE	30	43,846	-	-
NOVIEMBRE	02	43,982	-	-
DICIEMBRE	26	41,347	-	-

*(Registros no disponibles a partir de Agosto a la fecha)

DIAS DE MAYOR TRANSITO VEHICULAR
CASETA TEPOTZOTLAN

1993

1994

MES	DIA	VEHICULO	DIA	VEHICULO
ENERO	03	40,744	02	47,458
FEBRERO	07	37,761	06	34,946
MARZO	07	30,945	31	42,024
ABRIL	11	46,569	03	49,313
MAYO	08	32,390	08	35,591
JUNIO	06	31,813	05	32,856
JULIO	18	38,788	31	39,308
AGOSTO	15	39,325	14	40,047
SEPTIEMBRE	19	37,332	18	48,118
OCTUBRE	30	42,880	29	38,486
NOVIEMBRE	02	42,996	26	35,168
DICIEMBRE	23	40,839	17	43,314

DIAS DE MAYOR TRANSITO VEHICULAR
CASETA TEPOTZOTLAN

1995

1996

MES	DIA	VEHICULO	DIA	VEHICULO
ENERO	01	42,202	01	37,063
FEBRERO	18	34,515	03	35,024
MARZO	04	1,629	30	33,586
ABRIL	16	45,265	04	42,432
MAYO	01	32,195	12	29,948
JUNIO	17	29,662	15	29,550
JULIO	29	31,617	27	31,939
AGOSTO	06	34,139	17	33,042
SEPTIEMBRE	15	32,799	14	41,139
OCTUBRE	14	27,794	26	28,511
NOVIEMBRE	18	36,911	03	31,680
DICIEMBRE	30	36,101	21	40,933

III.3.4 VARIACION HORARIA

La variación horaria del tránsito, permite detectar aquellos períodos del día en que hay mayores concentraciones de la demanda y por consiguiente, donde conviene realizar análisis detallados sobre las condiciones de operación para detectar posibles puntos débiles del sistema.

Para la caseta de cobro Tlalpan sentido México-Cuernavaca en los días de estudio se observó lo siguiente el día viernes el período de máxima demanda ocurre entre las 16:00 y 21:00, el día sábado el período de máxima demanda se presenta entre las 10:00 y 14:00 y para el día domingo se manifiesta el período de máxima demanda entre las 8:00 y 12:00. En cada período antes mencionados circula aproximadamente el 40% del volumen diario que transita en este sentido.

Para la caseta de cobro Tlalpan sentido Cuernavaca-México en los días de estudio se observó lo siguiente: el día viernes, el período de máxima demanda ocurre entre las 16:00 y 21:00; el día sábado, el período de máxima demanda se presenta entre las 18:00 y 22:00 y para el día domingo se manifiesta el período de máxima demanda entre las 18:00 y 21:00. El período que más volumen diario presenta en este sentido es el del día domingo con más del 50%.

Para la caseta de cobro Tepotzotlán sentido México-Querétaro en los días de estudio se observó lo siguiente: el día viernes, el período de máxima demanda ocurre entre las 15:00 y 19:00; el día sábado, el período de máxima demanda se presenta entre las 8:00 y 12:00 y para el día domingo se manifiesta el período de máxima demanda entre las 8:00 y 13:00. En cada período antes mencionados circula más del 30% del volumen diario que transita en este sentido.

Para la caseta de cobro Tepotzotlán sentido Querétaro-México en los días de estudio se observó lo siguiente: el día viernes, el período de máxima demanda ocurre entre las 16:00 y 21:00; el día sábado, el período de máxima demanda se presenta entre las 17:00 y 21:00 y para el día domingo se manifiesta el período de máxima demanda entre las 17:00 y 21:00. El período que más volumen diario presenta en este sentido es el del día domingo con aproximadamente 50%.

Cabe mencionar que las variaciones de los volúmenes de tránsito a lo largo de las horas del día, dependen del tipo de ruta, según las actividades que prevalezcan en ella, puesto que hay rutas de tipo turístico, agrícola, comercial, etc. Los resultados anteriores se pueden verificar en las tablas que se presentan a continuación.

VOLUMENES DE TRANSITO VEHICULAR

CASETA TLALPAN

23/01/98
VIERNES

24/01/98
SABADO

25/01/98
DOMINGO

HORA	A*	B**	A	B	A	B
00-01	259	128	237	126	107	220
01-02	83	77	119	94	75	154
02-03	68	86	83	76	51	112
03-04	58	84	77	78	43	92
04-05	109	92	101	91	53	89
05-06	148	122	181	108	66	79
06-07	234	200	336	171	121	99
07-08	384	336	622	210	280	124
08-09	506	419	908	314	538	181
09-10	580	485	1,195	405	734	265
10-11	682	467	1,544	433	865	335
11-12	693	474	1,945	463	867	450
12-13	637	486	1,900	532	794	631
13-14	637	493	1,673	624	635	895
14-15	656	489	1,309	722	467	1,139
15-16	743	590	1,097	687	303	1,260
16-17	975	578	871	646	334	1,595
17-18	1,124	599	696	669	314	1,835
18-19	1,072	599	614	985	376	2,041
19-20	1,004	606	596	1,210	451	1,978
20-21	1,073	510	517	1,164	409	2,348
21-22	864	413	370	844	381	1,627
22-23	681	316	222	594	248	1,321
23-24	241	160	364	206	151	360
TOTAL	13,511	8,809	17,577	11,452	8,663	19,230
MAXIMO	1,124	606	1,945	1,210	867	2,348

*Sentido México-Cuernavaca

**Sentido Cuernavaca-México

VOLUMENES DE TRANSITO VEHICULAR

CASETA TLALPAN

13/03/98
VIERNES

14/03/98
SABADO

15/03/98
DOMINGO

HORA	A*	B**	A	B	A	B
00-01	143	111	243	170	130	229
01-02	84	81	148	99	93	165
02-03	76	74	98	79	66	110
03-04	81	73	89	106	46	79
04-05	138	107	121	89	66	92
05-06	196	120	216	165	94	88
06-07	296	210	398	159	188	118
07-08	421	349	834	231	566	190
08-09	566	504	1,284	344	1,077	215
09-10	639	452	1,597	410	1,160	315
10-11	691	445	1,936	439	1,182	374
11-12	733	444	2,170	464	1,201	514
12-13	651	441	2,195	500	970	688
13-14	633	486	1,824	631	732	889
14-15	712	507	1,089	510	488	1,155
15-16	843	547	1,027	623	434	1,123
16-17	1,053	564	1,081	717	469	1,653
17-18	1,321	541	799	815	541	2,411
18-19	1,107	646	698	1,148	557	2,584
19-20	1,101	612	576	1,441	646	2,720
20-21	1,076	596	578	1,436	541	2,754
21-22	1,009	434	400	916	502	790
22-23	776	280	300	589	380	508
23-24	489	198	663	413	312	458
TOTAL	14,835	8,822	20,364	12,494	12,441	20,222
MAXIMO	1,321	646	2,195	1,441	1,201	2,754

*Sentido México-Cuernavaca

**Sentido Cuernavaca-México

VOLUMENES DE TRANSITO VEHICULAR

CASETA TEPOTZOTLAN

20/03/98
VIERNES

21/03/98
SABADO

22/03/98
DOMINGO

HORA	A*	B**	A	B	A	B
00-01	339	318	576	467	219	294
01-02	236	360	306	318	143	232
02-03	191	315	195	333	102	178
03-04	190	362	151	322	93	221
04-05	256	474	228	467	101	208
05-06	380	521	410	436	186	264
06-07	602	505	976	490	353	254
07-08	813	635	1,364	529	644	278
08-09	763	704	1,822	629	859	350
09-10	797	680	1,718	688	840	387
10-11	840	823	1,719	707	873	469
11-12	980	774	1,533	761	788	533
12-13	910	657	1,462	666	846	669
13-14	815	891	1,216	585	767	855
14-15	1,001	817	799	643	670	1,024
15-16	1,035	888	690	709	672	1,102
16-17	1,174	943	885	880	602	1,517
17-18	1,195	863	735	948	602	1,698
18-19	1,136	1,013	616	1,029	732	2,175
19-20	937	1,008	564	1,049	716	2,238
20-21	980	969	541	1,029	637	2,014
21-22	952	774	396	782	419	1,454
22-23	823	861	305	598	273	763
23-24	810	574	285	429	219	358
TOTAL	18,155	16,729	19,492	15,494	12,356	19,535
MAXIMO	1,195	1,013	1,822	1,049	873	2,238

*Sentido México-Querétaro

**Sentido Querétaro-México

De las tablas anteriores se realizaron gráficas que ayudaran a visualizar el comportamiento de ambas plazas de cobro en los días de estudio. De la gráfica del día 13 de marzo que muestra el comportamiento del tráfico vehicular de la plaza de cobro Tlalpan observamos lo siguiente: de las 00:00 hasta las 05:00 horas el flujo vehicular es similar en ambos sentidos y a partir de las 06:00 horas el flujo vehicular del sentido México-Cuernavaca es superior al de Cuernavaca-México hasta las 24:00 horas. En este día circuló un total de 23,657 vehículos de los cuales el 62.7% corresponden al sentido Mex-Cuer y el 37.3% para el sentido Cuer-Mex.

Para el día sábado 14 de marzo el comportamiento es el siguiente: de las 0:00 hasta las 06:00 horas es parecido el flujo vehicular para ambos sentidos, de las 07:00 hasta las 17:00 horas el flujo vehicular del sentido Mex-Cuer es notoriamente superior al de Cuer-Mex y de las 18:00 hasta las 23:00 horas el tránsito es superior en el sentido Cuer-Mex y las 24:00 horas se invierte el flujo, es decir, hay más vehículos que transitan de Mex-Cuer que de Cuer-Mex. Transitaron en total 32,858 vehículos en este día, siendo el 62% para el sentido Mex-Cuer y el 38% para Cuer-Mex.

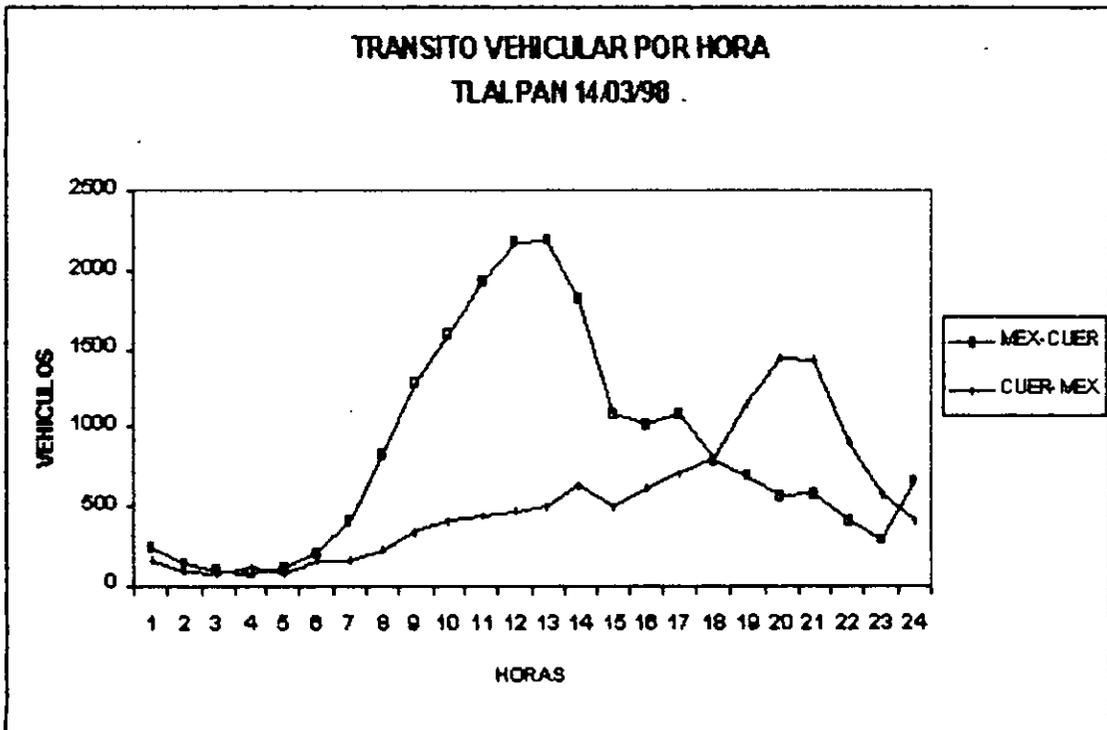
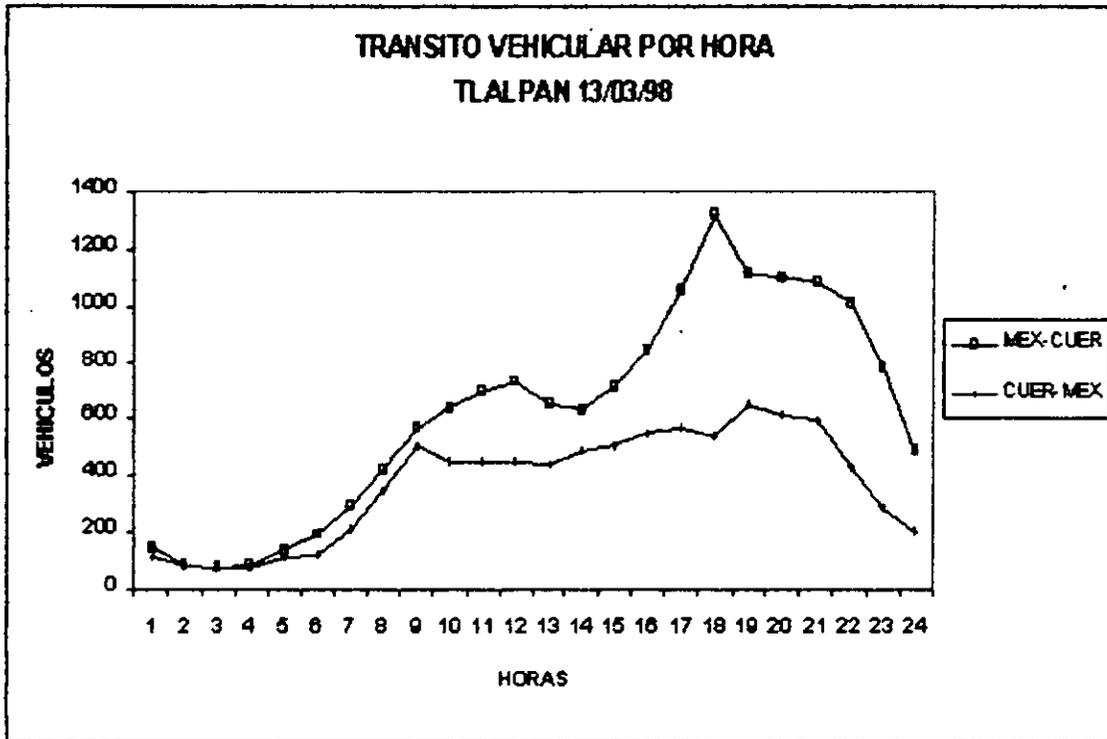
Del día domingo 15 de marzo se observa en la gráfica que de las 00:00 hasta las 07:00 horas no hay mucha diferencia en el comportamiento de los dos sentidos de las 08:00 hasta las 13:00 horas el flujo superior de vehículos se encuentra en el sentido Mex-Cuer, no así de las 14:00 hasta las 24:00 horas que el flujo máximo se halla en el sentido Cuer-Mex. En ambos sentidos se presentó un total de 32,663 vehículos en este día siendo el 62% para Cuer-Mex y el 38% para Mex-Cuer.

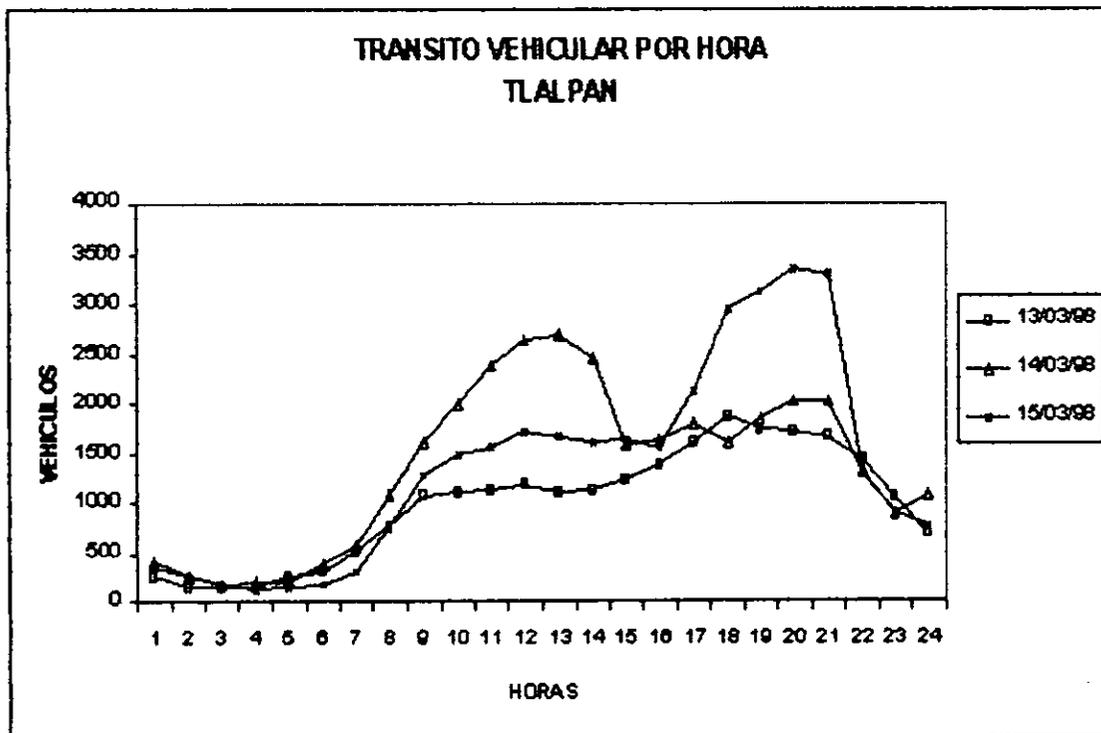
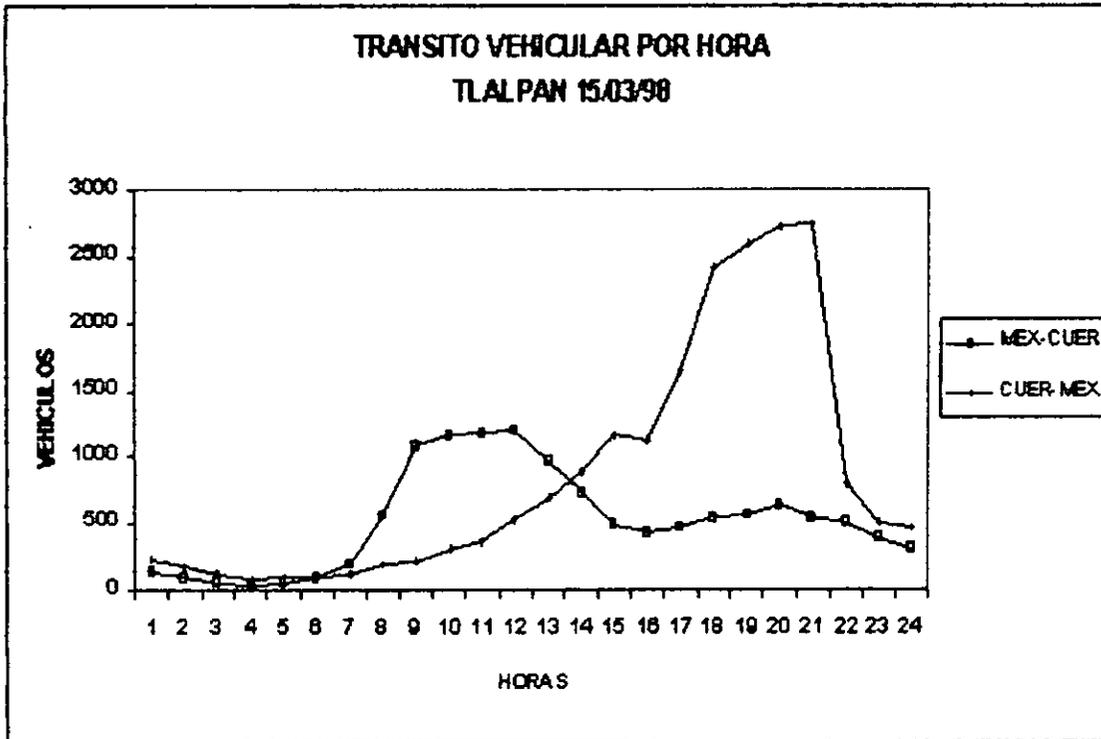
De la gráfica del día viernes 20 de marzo que muestra el comportamiento del tráfico vehicular de la plaza de cobro Tepotzotlán observamos que en las siguientes horas el volumen vehicular es superior en el sentido Querétaro-México, es decir, a las 0:00 a 06:00 horas, 14:00, 20:00 y a las 23:00 horas y para el sentido México-Querétaro el flujo vehicular superior se presentó de las 7:00 a 13:00 horas, de las 15:00 a 19:00 horas, de las 21:00 a 22:00 horas y a las 24 horas. En este día circuló un total de 34,884 vehículos de los cuales el 52% corresponden al sentido Mex-Qro y el 48% para el sentido Qro-Mex.

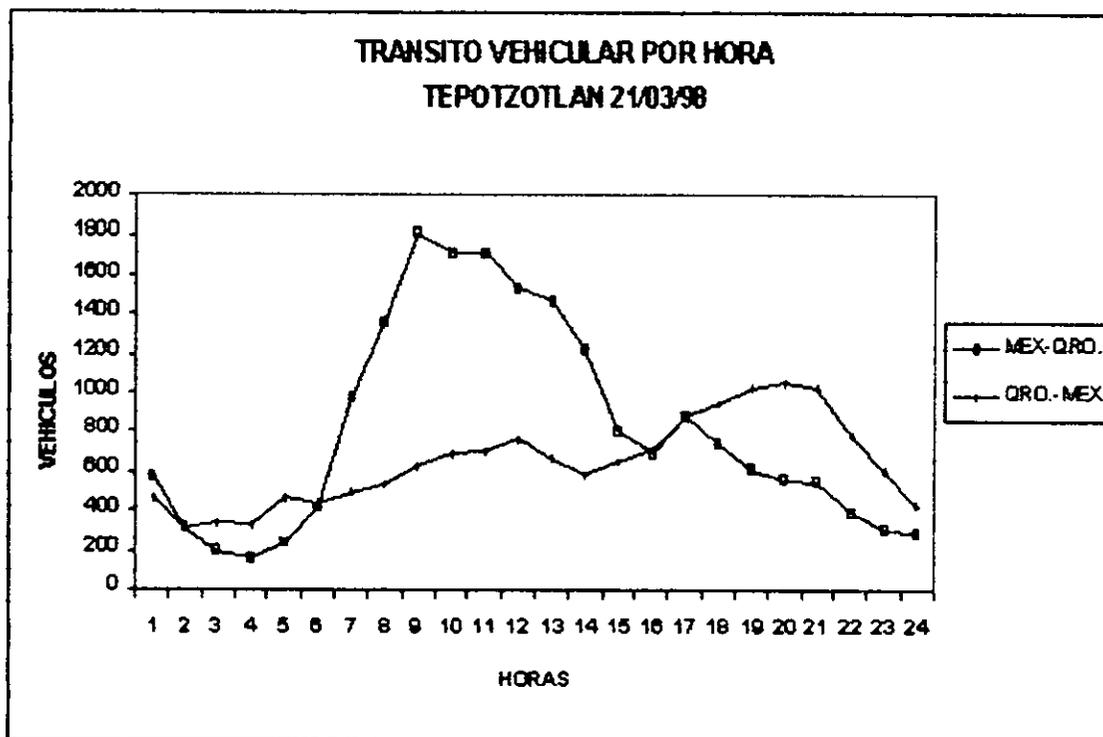
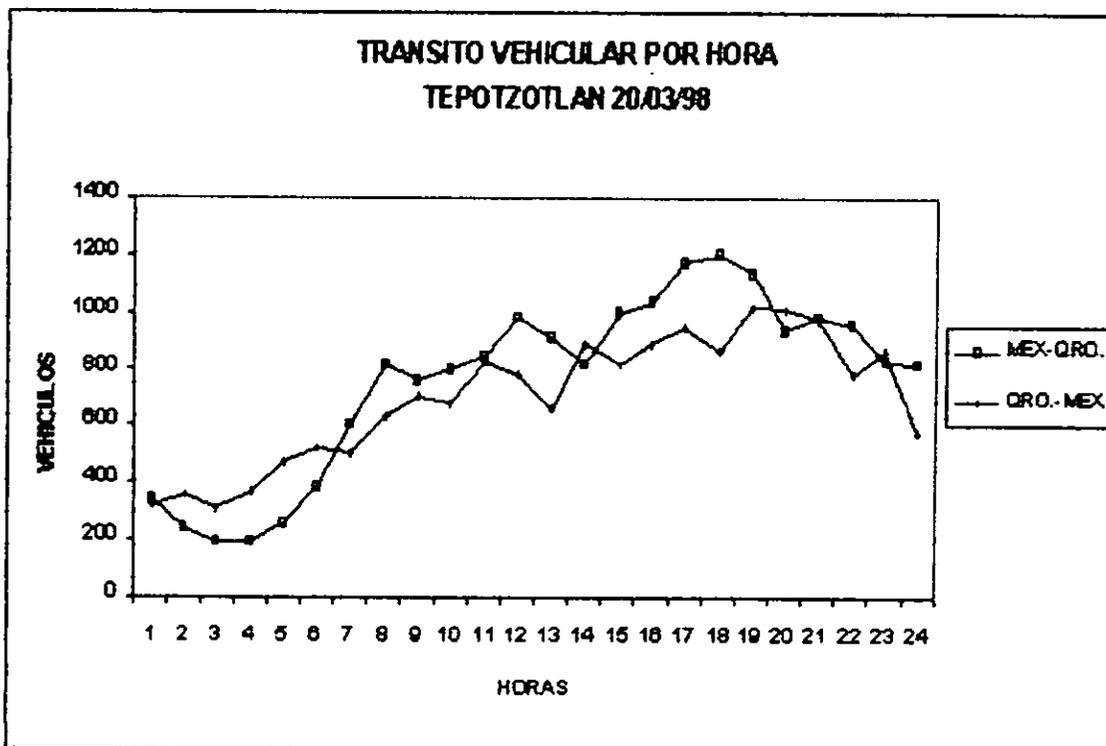
Para el día sábado 21 de marzo el comportamiento es el siguiente: de las 03:00 hasta las 06:00 horas el flujo vehicular del sentido Qro-Mex es notoriamente superior al de Mex-Qro y de las 07:00 hasta las 15:00 horas el tránsito es superior en el sentido Mex-Qro y de las 18:00 hasta las 24:00 horas se invierte el flujo, es decir, hay más vehículos que transitan de Qro-Mex que de Mex-Qro. Transitaron en total 34,986 vehículos en este día, siendo el 56% para el sentido Mex-Qro y el 44% para Qro-Mex.

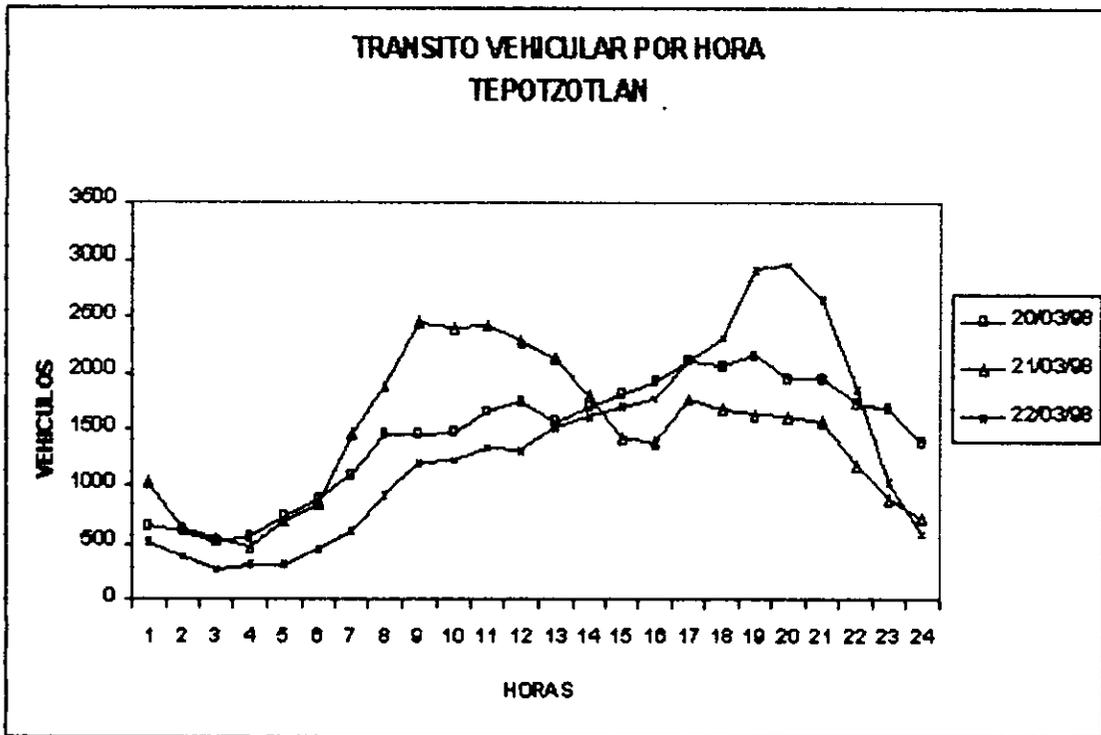
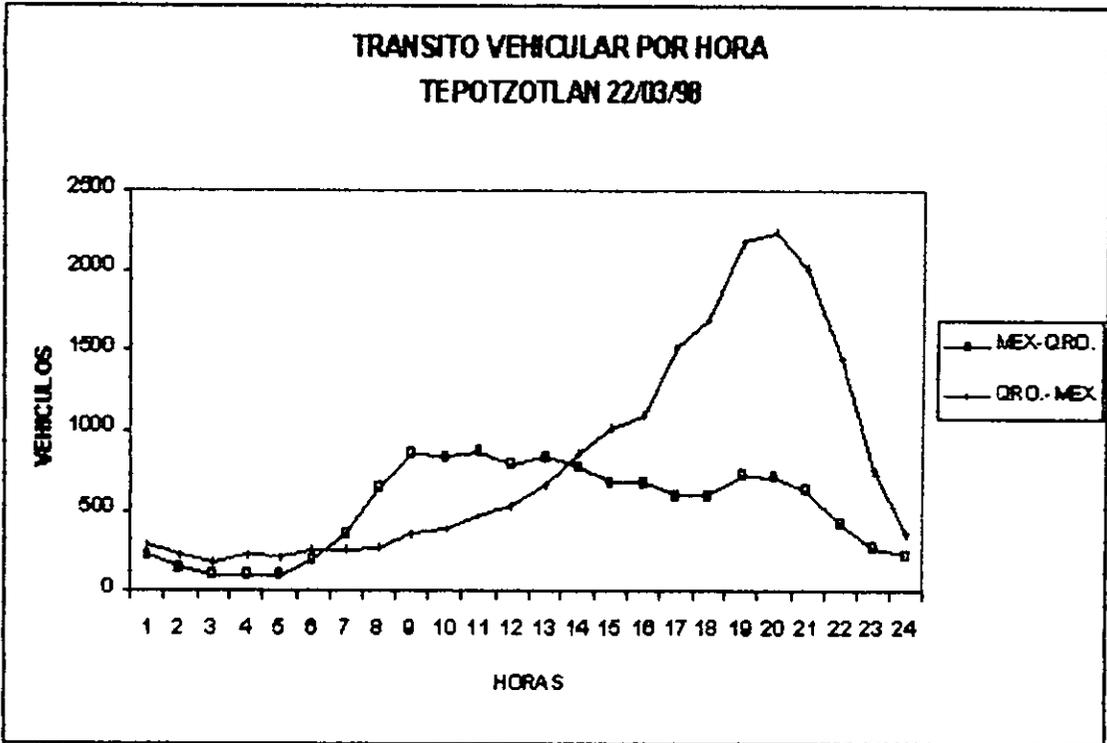
Del día domingo 22 de marzo se observa en la gráfica que de las 00:00 hasta las 06:00 horas no hay mucha diferencia en el comportamiento de los dos sentidos de las 07:00 hasta las 13:00 horas el flujo superior de vehículos se encuentra en el sentido Mex-Qro, no así

de las 14:00 hasta las 24:00 horas que el flujo máximo se halla en el sentido Qro-Mex. En ambos sentidos se presentó un total de 31,891 vehículos en este día siendo el 61% para Qro-Mex y el 39% para Mex-Qro.









III.3.5 COMPOSICION VEHICULAR

Mediante la composición del tránsito, puede conocerse la medida en que participan los diferentes tipos de vehículos en la corriente vehicular. La composición vehicular se mide en términos de porcentajes sobre el volumen total. En el caso de México es muy común encontrar porcentajes típicos o medios del orden de 60% automóviles, 10% autobuses y 30% camiones, con variaciones de $\pm 10\%$, dependiendo del tipo de carretera, la hora del día, el día de la semana y la temporada del año.

La composición vehicular que transita en el año en la plaza de cobro de Tlalpan es 85% automóviles, 6% autobuses y 9% camiones; para la plaza de cobro de Tepotzotlán los porcentajes son 60% automóviles, 11% autobuses y 29% camiones. Para los días de estudio se registraron en promedio porcentajes similares a los antes mencionados. Los porcentajes de la composición vehicular de ambas plazas de cobro de 1993 a 1996 se observan en las tablas siguientes.

TRANSITO POR TIPO DE VEHICULO EN PORCENTAJE
MEXICO-CUERNAVACA
TLALPAN

VEHICULO	1993	1994	1995	1996
Automóvil	85.65	85.27	85.09	83.95
Autobuses	4.49	5.16	6.48	8.61
Camiones	9.85	9.57	8.43	7.44

TRANSITO POR TIPO DE VEHICULO EN PORCENTAJE
MEXICO-QUERETARO
TEPOTZOTLAN

VEHICULO	1993	1994	1995	1996
Automóvil	61.08	59.07	63.51	56.50
Autobuses	10.16	11.66	12.73	11.41
Camiones	28.77	29.28	23.76	32.09

III.3.6 PRONOSTICOS DEL TDPA PARA LAS PLAZAS DE COBRO

PLAZA DE COBRO TLALPAN

AÑO	TDPA
1998	22,927
1999	23,495
2000	24,087
2001	24,701
2002	25,341
2003	26,006
2004	26,697
2005	27,417
2006	28,165
2007	28,943

Fuente: Coutiño y Asociados.

PLAZA DE COBRO TEPOTZOTLAN

AÑO	TDPA
1998	30,666
1999	31,786
2000	32,951
2001	34,162
2002	35,423
2003	36,733
2004	38,096
2005	39,513
2006	40,987
2007	42,521

Fuente: Coutiño y Asociados.

III.3.7 FACTORES DE CORRECCION

El volumen horario de diseño es un volumen horario futuro que se utiliza en los proyectos. Usualmente es el trigésimo volumen horario más alto del año del diseño. Como los volúmenes de tránsito son mucho más grandes durante ciertas horas del día o del año, la carretera se diseña para estas horas de tránsito máximo u horas pico.

La experiencia ha indicado que no resulta económico diseñar la carretera promedio para un volumen horario mayor a aquel que se excederá únicamente durante 29 horas en un año. Por lo tanto, el volumen del tránsito horario que se utiliza para el diseño, es el de la trigésima hora más alta. Se puede obtener un valor aproximado de la trigésima hora más alta aplicando un porcentaje empírico al futuro TDP. La trigésima hora más alta, considerada como un porcentaje del tránsito diario promedio, puede variar entre el 8 y el 38 por ciento ³.

PLAZA DE COBRO TLALPAN

FECHA	SENTIDO DE CIRCULACION	FACTOR I	FACTOR II	FACTOR III	FACT. DE LA HORA PICO POR SENTIDO
13/03/98	MEX.-CUERN.	0.0561	1.0813	0.9675	5.87%
15/03/98	CUERN.-MEX.	0.0843	1.0813	1.3423	12.24%

PLAZA DE COBRO TEPOTZOTLAN

FECHA	SENTIDO DE CIRCULACION	FACTOR I	FACTOR II	FACTOR III	FACT. DE LA HORA PICO POR SENTIDO
20/03/98	MEX.-QRO.	0.0343	0.9620	1.1904	3.93%
22/03/98	QRO.-MEX.	0.0702	0.9620	1.0883	7.35%

FI= Factor por Sentido de Circulación

FII= Factor de Ajuste Anual

FIII= Factor de Ajuste del Día de la Semana

³ Wright (1993).

IV. METODOLOGIA

IV.1 INVESTIGACION DE CAMPO

A partir de la información que existe por parte de CAPUFE relacionada con las características geométricas de las carreteras México-Cuernavaca y México-Querétaro y de los sitios de ubicación de sus plazas de cobro (Tlalpan y Tepotzotlán respectivamente) se verificará y se complementará la información faltante o corrigiendo aquella que tenga variaciones, para diseñar un formato que proporcione la información relevante de la plaza de cobro.

Asimismo, se deberá verificar las características principales de las plazas de cobro en cuanto a dimensiones y forma, considerando que éstas pueden influir en la operación de cada una de ellas, la información del equipo utilizado para el cobro, clasificación y conteo vehicular, que se utilizará para conocer los tiempos reales con los que se lleve a cabo el paso de cada vehículo, según sus características y su forma de pago, el procedimiento que marque la asignación de cabinas abiertas para ambos sentidos. Como en el punto anterior y en función de la información que se identifique como relevante en cuanto a las características de la infraestructura existente, se diseñará un formato que constituya parte de la metodología.

Se harán observaciones de la operación de las plazas de cobro a fin de identificar problemas que se presenten en las horas pico, principalmente asociados a los volúmenes de tránsito, así como aquellos que ocurran en los períodos de máxima demanda.

Con el fin de determinar los insumos que sirvan para el desarrollo del modelo de líneas de espera se analizarán los datos que se encuentran en los aforos realizados por CAPUFE, además se identificarán los períodos de máxima demanda contenidos en días laborables y de fin de semana correspondiente al período 1993-1996; asimismo los datos diarios y horarios de ellos.

Una vez identificados los días y sus períodos de máxima demanda (alrededor de la hora pico) en las plazas de cobro, se harán mediciones tales como las formas de arribo de los vehículos a las plazas, identificando la cabina que proporciona el servicio así como el tiempo que tarda en darlo, las longitudes de cola, tiempos de espera de los vehículos que pasan a formar la cola. En la medición de estos tiempos se tomará en cuenta el tipo de vehículo y el tipo de cobro (efectivo o IAVE⁴), particularmente para aquellos casos en los que existan carriles especiales, se indicará las causas que motivan el consumo de los diferentes tiempos, ya que puede producirse por una situación excepcional o de manera

⁴ Sistema de Identificación Automática Vehicular.

rutinaria. De estos datos se elegirán aquellos que sirvan como insumos para el modelo matemático que se utilizará.

IV.2 ANALISIS DE LA INFORMACION EXISTENTE

El análisis se hará considerando los aforos totales, por sentido y clasificados por tipo de vehículo, así como por mes y por día, para un período de cuatro años. Como ya se mencionó esta información nos ayudará a identificar el comportamiento de los volúmenes de tránsito vehicular que pasan por las plazas de cobro durante un período de tiempo, ya sea anual, mensual, diario y horario. De esta manera podremos determinar las horas pico y los períodos de máxima demanda alrededor de la misma, conocer cual es el tránsito promedio diario anual que nos ayudará a hacer proyecciones de la demanda en un horizonte de 10 años, con las cuales será posible estimar las condiciones de operación en las plazas de cobro en un futuro. Una vez que se haya realizado la investigación de campo se tendrán los elementos suficientes para poder determinar el comportamiento de la plaza de cobro, es decir, su forma de operación y la demanda de vehículos que circula por ella, y conocer si existen problemas de saturación por el volumen de tránsito vehicular o por la forma que actualmente se operan las plazas de cobro. Por lo tanto, podremos pasar al desarrollo del modelo sobre la base de la Teoría de Colas y su aplicación.

IV.3 DESARROLLO DEL MODELO

Con base en la información recabada se determinarán los parámetros necesarios para el desarrollo del modelo como son los tiempos de arribo y los tiempos de servicio. Con estos datos se hará una prueba de bondad de ajuste para verificar que se comportan de acuerdo a una distribución de probabilidad requerida por el modelo. Una vez verificado lo anterior y considerando el principio de disciplina "primero en llegar, primero en recibir servicio" y el número total de cabinas que ofrecen el servicio se determinarán las medidas de desempeño.

El modelo tendrá una aplicación sencilla y ordenada que proporcione el resultado siguiente: una solución que determine (con base en la historia de llegadas, servicios, longitud de cola, etc.) el comportamiento de la plaza de cobro que permita a su vez conocer la capacidad actual y condiciones futuras de operación, los resultados se valorarán con un análisis de sensibilidad de las principales variables: número de cabinas, tiempo de servicio y tiempo de arribo.

IV.4 APLICACION

Una vez definidas e integradas todas las partes de la metodología se procederá a su aplicación en las plazas de cobro de Tlalpan y Tepotzotlán. Como resultado de la aplicación se obtendrá lo siguiente: capacidad actual de operación, proyección futura de la operación en un horizonte de 10 años y el efecto de incrementar su capacidad al agregar cabinas, dentro de este mismo período, a ambas plazas de cobro. Una vez realizados todos los pasos de la metodología se tendrán resultados para decidir si la capacidad actual de las plazas de cobro se encuentra saturada o si se satura por el mal manejo que se les da o a otros factores no relacionados con lo anterior.

V. LINEAS DE ESPERA

V.1 CONGESTIONAMIENTO EN PLAZAS DE COBRO

Uno de los objetivos fundamentales de la ingeniería de tránsito y transporte es el de planear, diseñar y operar los sistemas viales, de tal manera que las demoras inducidas a los usuarios sean mínimas. En los períodos de máxima demanda, el movimiento vehicular se va tornando deficiente con pérdidas de velocidad, lo que hace que el sistema tienda a saturarse, hasta llegar a niveles de congestión. Las demoras y las colas, resultado del congestión, es un fenómeno de espera comúnmente asociado a muchos problemas de tránsito.

La teoría de colas, mediante el uso de algoritmos y modelos matemáticos, es una herramienta importante para el análisis del congestión en plazas de cobro. En general, las situaciones de demoras las ocasiona la variabilidad del flujo de tránsito, pues hay períodos en que la demanda puede llegar a ser muy grande.

V.2 PROBLEMAS DE ESPERA

Una línea de espera o cola ocurre en cualquier sistema en un tiempo dado, si el número de clientes que desean el servicio excede la capacidad de las instalaciones del mismo. Es claro que la capacidad promedio de los servicios debe ser suficiente para soportar la tasa promedio de arribos.

Una línea de espera está constituida por un cliente que requiere de un servicio (proporcionado por un servidor) en un determinado período. Los clientes entran aleatoriamente al sistema y forman una o varias colas (o líneas de espera) para ser atendidos. Si el servidor está desocupado, de acuerdo a ciertas reglas preestablecidas, conocidas con el nombre de disciplina del servicio, se proporciona el servicio a los clientes de la cola. El cliente será

IV.4 APLICACION

Una vez definidas e integradas todas las partes de la metodología se procederá a su aplicación en las plazas de cobro de Tlalpan y Tepetzotlán. Como resultado de la aplicación se obtendrá lo siguiente: capacidad actual de operación, proyección futura de la operación en un horizonte de 10 años y el efecto de incrementar su capacidad al agregar cabinas, dentro de este mismo período, a ambas plazas de cobro. Una vez realizados todos los pasos de la metodología se tendrán resultados para decidir si la capacidad actual de las plazas de cobro se encuentra saturada o si se satura por el mal manejo que se les da o a otros factores no relacionados con lo anterior.

V. LINEAS DE ESPERA

V.1 CONGESTIONAMIENTO EN PLAZAS DE COBRO

Uno de los objetivos fundamentales de la ingeniería de tránsito y transporte es el de planear, diseñar y operar los sistemas viales, de tal manera que las demoras inducidas a los usuarios sean mínimas. En los períodos de máxima demanda, el movimiento vehicular se va tornando deficiente con pérdidas de velocidad, lo que hace que el sistema tienda a saturarse, hasta llegar a niveles de congestionamiento. Las demoras y las colas, resultado del congestionamiento, es un fenómeno de espera comúnmente asociado a muchos problemas de tránsito.

La teoría de colas, mediante el uso de algoritmos y modelos matemáticos, es una herramienta importante para el análisis del congestionamiento en plazas de cobro. En general, las situaciones de demoras las ocasiona la variabilidad del flujo de tránsito, pues hay períodos en que la demanda puede llegar a ser muy grande.

V.2 PROBLEMAS DE ESPERA

Una línea de espera o cola ocurre en cualquier sistema en un tiempo dado, si el número de clientes que desean el servicio excede la capacidad de las instalaciones del mismo. Es claro que la capacidad promedio de los servicios debe ser suficiente para soportar la tasa promedio de arribos.

Una línea de espera está constituida por un cliente que requiere de un servicio (proporcionado por un servidor) en un determinado período. Los clientes entran aleatoriamente al sistema y forman una o varias colas (o líneas de espera) para ser atendidos. Si el servidor esta desocupado, de acuerdo a ciertas reglas preestablecidas, conocidas con el nombre de disciplina del servicio, se proporciona el servicio a los clientes de la cola. El cliente será

atendido en un período determinado de tiempo, llamado tiempo de servicio. Al finalizar éste, el cliente abandona el sistema. Los clientes que se forman en una cola lo hacen en un área de espera.

Las características básicas de un problema de espera son las siguientes:

1. La entrada o fuente de llegadas de los clientes. La fuente de entrada significa la forma en que ocurren las llegadas, especificada por el tiempo entre llegadas de cualquiera dos llegadas consecutivas; una medida usualmente considerada es la longitud promedio del tiempo entre llegadas o sus recíprocos, el número promedio de arribos por unidad de tiempo. Una característica de la fuente de entrada es su tamaño. El tamaño es el número total de clientes que pueden requerir servicio en determinado momento, el cual puede ser finito o infinito. También se debe especificar el patrón estadístico mediante el cual se generan los clientes a través del tiempo.
2. La fuente de servicio. Por fuente de servicio entenderemos la manera en que los servicios son prestados, el cual está especificado por el tiempo tomado para completar un servicio. Una medida típica es proporcionada por el tiempo promedio requerido para servir una unidad o por el número promedio de unidades servidas por unidad de tiempo. Se debe especificar la distribución de probabilidad de los tiempos de servicios.
3. El número de servidores. Un sistema puede tener un solo servidor o un número de servidores en paralelo. Un arribo que encuentra más de un servidor vacío puede escoger aleatoriamente cualquiera de ellos para recibir el servicio. Si encuentra todos los servidores ocupados, se une a la fila común de todos los servidores.
4. La capacidad del sistema. Un sistema puede tener una capacidad infinita, es decir, que la fila puede crecer de cualquier longitud. Si es finita tendría que estar especificado por el número de lugares disponibles para la fila.
5. La disciplina de la cola o disciplina de servicio. El método por el cual se selecciona un cliente para darle un servicio de entre todos los que esperan recibirlo. La que se supone como normal es "primero en llegar, primero en salir".

Las tres medidas más importantes son la tasa promedio de llegadas (denotado por λ), la tasa promedio de servicio (denotado por μ), y el número de servidores en paralelo con una sola fila ($c \geq 1$).

Cuando un sistema de colas apenas inicia su operación, el estado del sistema (el número de clientes en el sistema) se encuentra bastante afectado por el estado inicial y el tiempo que ha pasado desde el inicio. Se dice entonces que el sistema se encuentra en condición transitoria. Después de que ha pasado un tiempo suficiente, el estado del sistema se vuelve independiente del estado inicial y del tiempo transcurrido. Así se puede decir

que el sistema ha alcanzado su condición de estado estacionario, en el que la distribución de probabilidad del estado del sistema se conserva a través del tiempo.

V.3 OBJETIVOS DE LA TEORIA DE COLAS

El objetivo de investigar los problemas de colas es corregir alguna irregularidad en el sistema, algunas de las cuales pueden ser:

1. Aumentando el número de cabinas.
2. Reduciendo el tiempo medio de servicio.
3. Proporcionando tarjeta IAVE a vehículos que frecuentemente utilizan las plazas de cobro.

VI. MODELO

VI.1 PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE

En muchas situaciones las condiciones prevalecientes hacen que parezca razonable que la población siga un modelo de probabilidad específico; sin embargo, es benéfico efectuar un procedimiento de prueba estadística para determinar la suficiencia del modelo. El procedimiento estadístico empleado se llama prueba de bondad de ajuste. Una prueba de bondad de ajuste se emplea para decir cuando un conjunto de datos se apega a una distribución de probabilidad dada, por ejemplo, exponencial, normal, Poisson, Erlang-k, gamma, etc.

Considérese una muestra aleatoria de tamaño n x_1, x_2, \dots, x_n de la distribución de una variable aleatoria X dividida en k clases exhaustivas y mutuamente excluyentes C_1, C_2, \dots, C_k . Esta prueba se determinará en un nivel de significancia α , si la distribución observada de los n valores dentro de las categorías es consistente con la hipótesis nula.

Considérese la verificación de la hipótesis nula

$$H_0 : F(x) = F_0(x)$$

en donde el modelo de probabilidad propuesto $F_0(x)$ se encuentra especificado, de manera completa, con respecto a todos los parámetros. De esta forma la hipótesis nula es sencilla. Dado que se especifica $F_0(x)$ de manera completa, se puede obtener la probabilidad E_i de obtener una observación en la i -ésima clase bajo H_0 , en donde necesariamente $\sum_{i=1}^k E_i = 1$.

La estadística

$$\sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

tiene una distribución, en forma aproximada, chi-cuadrada con $k - 1$ grados de libertad, si n tiene un valor suficientemente grande. De acuerdo con lo anterior, la estadística es la suma sobre todas las k clases de los cocientes de los cuadrados de las diferencias entre las frecuencias observada y esperada, y la frecuencia esperada. Para poder aceptar o rechazar la hipótesis nula debemos encontrar el valor crítico $\chi_{k-1, \alpha}^2$.

Si $\chi^2 \geq \chi_{k-1, \alpha}^2$, rechazamos H_0 ; en otro caso aceptamos H_0 .

VI.2 MODELO UNA LINEA DE ESPERA Y MULTIPLES SERVIDORES EN PARALELO ⁵

Este modelo estudia situaciones de espera que combinan procesos de llegadas y salidas, limitándonos al caso donde los vehículos son atendidos por S servidores en *paralelo*, de manera que pueden ofrecer en promedio servicio a S vehículos al mismo tiempo, cada uno en tiempos iguales, acelerando así la tasa de servicio al permitir servicios simultáneos. Una representación gráfica del modelo se encuentra en el Anexo B

VI.3 MEDIDAS DE DESEMPEÑO DE ESTADO ESTACIONARIO

En el estado estacionario el cálculo de las medidas de desempeño se usan para analizar la operación de las líneas de espera con el fin de hacer recomendaciones sobre la eficiencia del sistema.

Sea $P_m(t)$ la probabilidad de encontrar m vehículos en el sistema formados en la cola al tiempo t , de los cuales S reciben el servicio, en el caso de S servidores y $m - S$ vehículos están formados en la línea de espera. Dichas probabilidades están dadas por

$$P_m(t) = \frac{P_0(t)}{m!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^m, \quad \text{para } 0 \leq m \leq S,$$

$$P_m(t) = \left(\frac{P_0(t)}{S!S^{m-S}}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^m, \quad \text{para } m > S,$$

donde

$$P_0(t) = \left[\sum_{m=0}^{S-1} \frac{1}{m!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^m + \frac{1}{S!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^S \frac{S\mu}{(S\mu - \lambda)} \right]^{-1}.$$

Una vez que se ha determinado la probabilidad $P_m(t)$ ⁶ se pueden calcular las medidas de desempeño de estado estacionario, entre las principales se encuentran:

- W = número esperado de vehículos en el *sistema*
- L = número esperado de vehículos en la *fila*
- T_S = tiempo estimado de espera en el *fila*

⁵ Una notación adecuada para resumir las características principales de la línea de espera en *paralelo* es: $(M/M/S):(DG/\infty/\infty)$, en donde la primera entrada, M , representa la distribución de llegadas tipo Poisson, la segunda entrada, M , indica que el tiempo de servicio tiene una distribución exponencial negativa, S el número de servidores en paralelo, DG disciplina de servicio en general, y los dos últimos parámetros representan el número máximo admitido en el sistema (línea de espera más servicio) y tamaño de la fuente de arribos, respectivamente. Para mayor información ver Prawda (1980)

⁶ Ver Anexo A.

- $T_W =$ tiempo estimado de espera en el sistema

En este modelo se supone que los vehículos arriban a una tasa constante λ y un máximo de S vehículos son atendidos simultáneamente a la tasa de servicio μ por servidor. Si el número de vehículos en el sistema es igual o mayor que el número de servidores, $m > S$, la tasa combinada de salidas del sistema es $S\mu$. Por otra parte, si $m < S$ la tasa de servicio es igual a $m\mu$. Así, tenemos

$$\lambda_m = \lambda, \quad m \geq 0,$$

$$\mu_m = \begin{cases} m\mu, & m \leq S, \\ S\mu, & m \geq S. \end{cases}$$

Por lo que P_m puede ser calculada para $m \leq S$ como

$$P_m = \frac{\lambda^m}{\mu(2\mu)(3\mu) \cdots (m\mu)} P_0 = \frac{\lambda^m}{m! \mu^m} P_0,$$

y para $m \geq S$ como

$$P_m = \frac{\lambda^m}{\mu(2\mu) \cdots (S-1)\mu \underbrace{(S\mu)(S\mu) \cdots (S\mu)}_{(m-S) \text{ veces}}} P_0 = \frac{\lambda^m}{S! S^{m-S} \mu^m} P_0.$$

Si definimos la eficiencia del sistema como $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$, tenemos que

$$P_m = \begin{cases} \left(\frac{\rho^m}{m!} \right) P_0, & 0 \leq m \leq S, \\ \left(\frac{\rho^m}{S^{m-S} S!} \right) P_0, & m > S, \end{cases}$$

$$P_0 = \left\{ \sum_{m=0}^{S-1} \frac{\rho^m}{m!} + \frac{\rho^S}{S!(1-\rho/S)} \right\}^{-1},$$

donde $\rho/S = \lambda/\mu S < 1$. Finalmente, las expresiones de las principales medidas de desempeño quedan como sigue:

$$L = \left[\frac{\rho^{S+1}}{(S-1)!(S-\rho)^2} \right] P_0,$$

$$W = L + \rho,$$

$$T_S = \frac{L}{\lambda},$$

$$T_W = T_S + \frac{1}{\mu}.$$

Las operaciones con el modelo pueden ser tediosas, pero existen las aproximaciones útiles para P_0 y L [Morse (1958)] las cuales son:

$$\begin{aligned} \text{si } \rho \ll 1, \text{ entonces } & \begin{cases} P_0 \cong 1 - \rho, \\ L \cong \frac{\rho^{S+1}}{S^2}, \end{cases} \\ \text{si } \frac{\rho}{S} \approx 1, \text{ entonces } & \begin{cases} P_0 \cong \frac{(S - \rho)(S - 1)!}{S^S}, \\ L \cong \frac{\rho}{S - \rho}. \end{cases} \end{aligned}$$

VI.4 APLICACION DEL MODELO

Consideremos la carretera México-Cuernavaca con sus dos sentidos de tráfico. La plaza de cobro Tlalpan de esta carretera tiene en total 13 cabinas de cobro, pero para el sentido Cuernavaca-México solo se pueden ocupar hasta 11 cabinas. Tomemos la hora pico del día domingo (día de estudio para este sentido) la cual se presentó a las 20:00 horas. Las llegadas de los automóviles tienen una distribución de Poisson con λ igual a 0.6453 llegadas por segundo, mientras que el número de servicios tiene una distribución exponencial negativa con μ igual a 0.1002 servicios por segundo. No existe prioridad de trato en las cabinas, así que proporcionan servicio en la medida que se desocupan, y se atiende en primer término al primer automóvil de la cola y así sucesivamente.

Se describe en forma cuantitativa al sistema de cabinas. Primero se verifica que el parámetro $\frac{\lambda}{S\mu} < 1$, queriendo decir que en la carretera no se formará una cola infinita de automóviles o, en términos más reales, que esta cola no tiende a crecer sin límite: para $S > 6$ se cumple, por lo que el mínimo de cabinas abiertas para este horario es de 7

$$\frac{\lambda}{S\mu} = \frac{.6453}{7(.1002)} = 0.9200 < 1.$$

Se tiene

$$\frac{\lambda}{\mu} = \frac{.35}{.1111} = 6.4401$$

y

$$P_0(t) = \left[\sum_{m=0}^6 \frac{1}{m!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^m + \frac{1}{7!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^7 \left(\frac{7\mu}{7\mu - \lambda}\right) \right]^{-1} = 0.000677.$$

Lo anterior implica que existe un 0.0677% de probabilidades de que, al llegar un automóvil cualquiera a la plaza de cobro, en el tiempo t , las 7 cabinas de servicio se encuentren vacías

y no exista ningún automóvil esperando este servicio. Por lo tanto, no se forma una cola hasta que $m \geq 8$. El largo de la cola, L , es

$$L = \frac{\lambda \mu \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^S}{(S-1)!(S\mu - \lambda)^2} P_0(t) = 8.9005 \text{ automóviles.}$$

El número de elementos en el sistema W , es

$$W = L + \frac{\lambda}{\mu} = 15.3414 \text{ automóviles.}$$

El tiempo promedio de espera en la cola, T_s , es

$$T_s = \frac{L}{\lambda} = 13.7941 \text{ de segundo,}$$

mientras que el tiempo dentro del sistema, T_W , es

$$T_W = T_s + \frac{1}{\mu} = 23.7761 \text{ de segundo.}$$

Si al sistema se le agrega otra cabina, los tiempos de espera disminuirán así como el largo de la cola y el número de elementos, la misma tendencia se mantendrá si se sigue aumentando el número de cabinas. Se detiene el aumento de las cabinas cuando T_W es el deseado o cuando $T_W \approx \frac{1}{\mu}$.

⁷ Ver resultados en el Anexo C.

VII. MODELO CON LLEGADAS POR BLOQUES ⁸

A continuación se menciona otro modelo de la teoría de colas, el cual podría aplicarse al análisis de la capacidad de operación de las plazas de cobro de las carreteras México-Querétaro y México-Cuernavaca.

VII.1 EL TAMAÑO DEL SISTEMA EN TEMPORADAS DE SALIDA EN ESTADO ESTACIONARIO (LA FORMULA DE POLLACZEK-KHINCHIN)

Este modelo estudia problemas de espera en que las llegadas al sistema son en ciertas temporadas, cada una de ellas es por bloques de X vehículos y se describen como un proceso Poisson con tasa λ . Además, se considera la distribución del tiempo de servicio en general y un servidor únicamente.

Sean

$N(t)$ = el número de vehículos al tiempo t ;

$B(x) = P\{v \leq x\}$;

$B^*(s)$ = LST (La transformada de Laplace-Stieltjes) de v ;

X_n = el número de vehículos que se quedan en el sistema al salir el n -ésimo vehículo;

A_n = el número de vehículos que llegan durante el tiempo de servicio del vehículo n ;

$V(s)$ = el número de vehículos en el sistema en épocas de salida en estado estacionario.

Considérese la variable aleatoria X con una distribución $a_j = P(X = j)$ y función generadora de momentos

$$A(s) = \sum_j a_j s^j,$$

$$E(X) = \sum j a_j = A'(1) = a$$

El total de llegadas A tiene una distribución Poisson con función generadora de momentos

$$\exp\{-\lambda[1 - A(s)]\}.$$

Suponiendo que N es el número total de llegadas durante el tiempo de servicio dado a un vehículo, la función generadora de momentos de N está dada por

$$E[s^N] = K(s) = B^*[\lambda - \lambda A(s)].$$

⁸ Para resumir las características de este modelo se utiliza la notación: $M^X/G/1$, en donde M denota que las llegadas tienen distribución Poisson, la G indica que la distribución del tiempo de servicio es general, la X es la variable aleatoria del número de vehículos por cada bloque y 1 el número de servidores. Para mayor información ver Medhi (1991)

donde

$$B^*(s) = \int_0^{\infty} \exp^{-st} dB(t)$$

es la transformada de Laplace-Stieltjes.

La intensidad de tráfico es

$$\rho = \frac{\lambda E(X)}{\mu} = \frac{\lambda a}{\mu}.$$

Suponiendo que $\rho < 1$ de tal manera que no se haga la cola infinita, entonces la función generadora de momentos de $V(s)$, esto es, del número de vehículos en el sistema, está dado por

$$V(s) = \frac{(1 - \rho)(1 - s)B^*(\lambda - \lambda A(s))}{B^*(\lambda - \lambda A(s)) - s},$$

que es la fórmula de Pollaczek-Khinchin para el modelo $M^X/G/1$.

VII.2 DISTRIBUCION TIEMPO DE ESPERA

Sea D el tiempo total de espera para un vehículo en una fila; D depende de dos tiempos, D_1 y D_2 , donde D_1 es el tiempo de espera del primer vehículo del bloque en el que llegó el vehículo en cuestión que será servido, y D_2 es el tiempo de espera por el servicio de los miembros del bloque que son servidos antes del vehículo en cuestión, en otras palabras $D = D_1 + D_2$. Sea W , W_i , la función de distribución de D , D_i , $i = 1, 2$, respectivamente, y sean $W^*(s)$, $W_i^*(s)$ las LST (Transformada de Laplace-Stieltjes) de W , W_i , respectivamente. Sea $B(t)$ la función de densidad del tiempo de servicio y $B^*(s)$ su LST. Denotamos por $\beta^*(s)$ como la LST de la función de densidad del tiempo total de servicio de todos los vehículos que pertenecen al mismo grupo de llegada. Entonces

$$\begin{aligned} \beta^*(s) &= \sum_{k=1}^{\infty} a_k [B^*(s)]^k \\ &= A[B^*(s)] \end{aligned}$$

Para encontrar el tiempo de espera D_1 , consideremos un bloque como un total de un sólo supervehículo. Entonces la LST del tiempo de espera del primer miembro de todo el bloque en el cual el vehículo en cuestión llega, puede obtenerse de la expresión correspondiente de un sistema $M/G/1$ reemplazando $B^*(s)$ por $\beta^*(s)$. Esto es, si $\rho = \lambda a / \mu < 1$, entonces reemplazando $B^*(s)$ por $\beta^*(s)$, obtenemos $W_1^*(s)$, que es el LST del tiempo de espera D_1 :

$$W_1^*(s) = \frac{s(1 - \rho)}{s - \lambda[1 - A(B^*(s))]}.$$

Sea p_i la probabilidad de que el vehículo en cuestión llegue en un bloque de tamaño i , y sea K un número significativamente grande. Entonces en los primeros K bloques de llegadas, el número de bloques con i llegadas será aproximadamente $a_i K$, $i = 1, 2, \dots$, y el número total de vehículos que llegan en bloques de tamaño i serán aproximadamente $ia_i K$. Entonces, el número total de llegadas en K bloques es

$$\sum_{i=1}^{\infty} ia_i K$$

y la proporción de esas llegadas en bloques de tamaño i es

$$\frac{ia_i K}{\sum_i ia_i K} = \frac{ia_i}{\sum_i ia_i} = \frac{ia_i}{a},$$

donde $a = E(X)$. Entonces para una K grande,

$$p_i = \frac{ia_i}{a}.$$

Supongamos ahora que el vehículo llega en un bloque de tamaño i y que el servicio es aleatorio para los miembros de un bloque. Entonces la probabilidad de que el vehículo en cuestión sea el j -ésimo en el bloque de i es $1/i$, $j = 1, 2, \dots, i$. Nuevamente, si él es el j -ésimo vehículo atendido, su tiempo de espera en la cola será igual al tiempo de servicio de $(j - 1)$ vehículos del bloque de tamaño i , en el cual él llegó y son atendidos antes que él. Ahora, condicionando al tamaño del bloque i en el cual el vehículo llega, se tiene que:

$$\begin{aligned} P(D_2 \leq t) = W_2(t) &= \sum_{i=1}^{\infty} P\{\text{la espera} \leq t \mid \text{el vehículo llega en un bloque de tamaño } i\} p_i \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \left[\sum_{j=1}^i B^{(j-1)*}(t) \frac{1}{i} \right] p_i, \end{aligned}$$

donde B^{k*} es la k -ésima convolución de B consigo misma. Entonces,

$$W_2^*(s) = \frac{1 - A[B^*(s)]}{a[1 - B^*(s)]}.$$

Como $D = D_1 + D_2$, el LST del tiempo total de espera D del vehículo en cuestión está dado por

$$\begin{aligned} W^*(s) &= W_1^*(s)W_2^*(s) \\ &= \frac{s(1 - \rho)}{s - \lambda + \lambda A[B^*(s)]} \frac{1 - A[B^*(s)]}{a[1 - B^*(s)]}. \end{aligned}$$

Y el tiempo de espera en el sistema del vehículo en cuestión está dada por

$$W_s^*(s) = W^*(s)B^*(s).$$

VII.3 EL MODELO $M^X/M/1$

Este es un caso particular del modelo $M^X/G/1$, donde X , la variable aleatoria del número de vehículos por bloque, se distribuye geoméricamente:

$$P(X = k) = pq^{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots; \quad 0 < p, \quad q < 1$$

entonces,

$$\begin{aligned} a &= \left(\frac{1}{p}\right), \\ A[B^*(s)] &= \sum_{k=1}^{\infty} pq^{k-1}[B^*(s)]^k \\ &= \frac{pB^*(s)}{1 - qB^*(s)}. \end{aligned}$$

y como éste es un modelo $M^X/M/1$, con la distribución de llegadas geométrica $B^*(s) = \mu/(s + \mu)$, se tiene

$$A[B^*(s)] = \frac{p\mu}{s + p\mu}.$$

Entonces el LST del tiempo esperado en la cola es

$$W^*(s) = \frac{p(1 - \rho)(s + \mu)}{s + (p\mu - \lambda)},$$

el tiempo esperado en el sistema tiene un LST

$$\begin{aligned} W_s^*(s) &= W^*(s)B^*(s) \\ &= \frac{p\mu - \lambda}{s + (p\mu - \lambda)}, \end{aligned}$$

y la media del tiempo de espera en el sistema, que se distribuye exponencial, es

$$\frac{1}{(p\mu - \lambda)}.$$

CONCLUSIONES

La base del progreso económico nacional es el intercambio comercial que existe entre las diferentes entidades del país y éste está estrechamente ligado al hecho de trasladar personas y bienes de un lugar a otro. No es posible imaginar en la actualidad un estilo de vida sin un sistema de transporte que permita la movilidad necesaria para trabajar y aprovechar mejor el tiempo.

México cuenta con una red carretera que al paso de los años se ha ido incrementando, así como su funcionalidad ha ido cambiando. Al principio fue el unir las ciudades y puertos más importantes del país y en la actualidad es el impulsar el desarrollo de aquellas regiones que se encuentran todavía incomunicadas, así como fortalecer aquellas que son importantes para los diversos sectores económicos del país.

Gracias a que han existido diferentes agentes que han financiado, operado y conservado la red carretera se ha logrado el crecimiento, modernización y conservación de la misma. En la modernización de la red carretera se debe prestar suma atención a la conservación y mantenimiento de la infraestructura especialmente en aquellos tramos relacionados al comercio, a la ampliación de los segmentos carreteros de tráfico intenso y a la modificación de algunos aspectos de operación de las plazas de cobro a fin de efficientar su servicio.

Se escogieron las carreteras México-Cuernavaca y México-Querétaro por ubicarse entre las que mayor volumen de tránsito registran e igualmente sus plazas de cobro Tlalpan y Tepotzotlán respectivamente; además, por la cercanía a la Cd. de México. Por la plaza de cobro Tlalpan pasa el 95 por ciento del tránsito vehicular de la carretera México-Cuernavaca y en el caso de Tepotzotlán el porcentaje es del 57 por ciento.

Al observar el tránsito vehicular mensual de ambas plazas de cobro sobresalen los meses que coinciden con las vacaciones de Semana Santa, Verano y Navidad. El tránsito promedio diario anual de la plaza de cobro Tlalpan en 1996 fue 22,040 vehículos y para Tepotzotlán 28,409 vehículos. Al clasificar el volumen de tránsito vehicular por hora y por sentido de circulación nos permitió detectar aquellos períodos en donde se concentra la demanda del servicio en las plazas de cobro y es donde se realizaron los análisis más detallados. El período de estudio comprendió para ambas plazas los días viernes, sábado y domingo por ser los tres días de la semana donde se detecta más volumen de tráfico.

El período de estudio abarcó del 13 al 15 de marzo de 1998 para la plaza de cobro Tlalpan en donde se determinaron los períodos de máximo volumen de tránsito y la hora pico en ambos sentidos. Para el sentido México-Cuernavaca las horas pico en los diferentes días fueron las siguientes: para el día viernes fue a las 17:00 horas con un volumen de tránsito de 1,321 vehículos, para el sábado fue a las 12:00 horas con 2,195 vehículos y para el día domingo fue a las 11:00 horas con 1,201 vehículos. Resalta el día sábado por ser donde la

hora pico manifiesta más vehículos; representando el 11% del volumen de tránsito vehicular que circuló en ese sentido; en los períodos de máxima demanda que se mencionaron en el capítulo III circula aproximadamente el 40% del volumen diario.

En el sentido Cuernavaca-México las horas picos fueron las 18:00 horas del día viernes, las 19:00 horas del sábado y las 21:00 horas del día domingo con volúmenes de tránsito de 646; 1,441 y 2,754 respectivamente. En este sentido la hora pico más alta se presentó el día domingo representando el 14% del volumen del tránsito que circuló todo ese día por ese sentido, es en este mismo día que el período analizado presentó más del 50% del volumen diario.

Para la plaza de cobro de Tepetzotlán el período de estudio comprendió del 20 al 22 de marzo de 1998, para el sentido México-Querétaro las horas pico se manifestaron a las 17:00 horas, 8:00 horas y 10:00 horas de los días viernes, sábado y domingo respectivamente. La hora pico máxima de estos días fue el sábado con 1,822 vehículos que significa el 9% del volumen total.

Para el sentido Querétaro-México las horas pico fueron las 18:00 horas del día viernes las 19:00 horas del día sábado y las 19:00 del día domingo con un volumen de tráfico de 1,013; 1,049 y 2,238 respectivamente. Sobresale la hora pico del día domingo, la cual significa el 12% del volumen de tráfico total.

Mediante la composición vehicular distinguimos el porcentaje de los diferentes tipos de vehículos que transita en el año aproximadamente en las plazas de cobro. Para el caso de Tlalpan la composición es la siguiente 85% automóviles, 6% autobuses y 9% camiones; para el caso de Tepetzotlán los porcentajes son 60% automóviles, 11% autobuses y 29% camiones.

Tomando en consideración que uno de los objetivos del estudio es conocer la capacidad actual de las plazas de cobro se estimó conveniente saber, de igual manera, que pasaría en los próximos 10 años, por lo que se tomaron los pronósticos realizados, por el despacho Coutiño, del tránsito diario promedio anual, teniendo que calcularse algunos factores de corrección, los cuales son por sentido de circulación, por ajuste del día de la semana y por ajuste anual, que ayudaron a estimar por sentido y por fecha el tránsito en ambas plazas.

Se consideró de suma importancia realizar una metodología que abarcara la operatividad de las plazas de cobro que considerara algunas de las estadísticas que se tienen registradas en los aforos hechos por CAPUFE. Dentro de esta metodología se encuentra el desarrollo del modelo y su aplicación, los cuales se realizaron de acuerdo a los datos que se obtuvieron por parte de CAPUFE.

Cabe hacer mención que el desarrollo del modelo se realizó una vez que se aplicara la prueba de bondad de ajuste a los datos de los períodos de estudio y teniendo como resultado que el conjunto de datos se apegara a la distribución de probabilidad requerida, es decir, que la distribución de llegadas fuera tipo Poisson y que el tiempo de servicio

tuviera una distribución exponencial negativa. Lo anterior se comprobó con un nivel de significancia de 0.05.

En la aplicación del modelo se obtuvo lo siguiente:

El total de cabinas en la plaza de cobro de Tlalpan es de 13, pero en el sentido México-Cuernavaca solo se pueden disponer de un máximo de 8 y para el otro sentido hasta 11, esto ocurre porque no todas las cabinas son bidireccionales y algunas son exclusivas IAVE. Considerando lo anterior se variaron el número de cabinas abiertas, con las restricciones del mínimo aceptable por el modelo y el máximo dado por las cabinas disponibles para ambos sentidos, para conocer las medidas de desempeño y poder hacer comentarios al respecto. Por lo tanto, para el sentido México-Cuernavaca, del día 13 de marzo, se manifestó para la hora pico que el número de llegadas por segundo fue de 0.3171, mientras que los servicios por segundo fue de 0.0856, con lo anterior el modelo acepta como mínimo 4 cabinas abiertas con las cuales aproximadamente habría 14 vehículos en el sistema y, por lo tanto, esperando el servicio habrían 10 vehículos, el tiempo que tendrían que esperar en el sistema es de 45 segundos y en cola de 33 segundos y el factor de utilización es de 0.9256. Si aumentamos el número de cabinas hasta el máximo disponible, es decir hasta 8 cabinas abiertas, los resultados son los siguientes en el sistema habrían 4 vehículos y se podría decir que esperando no habría ninguno, los tiempos se reducirían a 11 segundos en el sistema y no se tendría que esperar para recibir el servicio, el factor de utilización sería de 0.4628.

Para el caso de Cuernavaca-México del día 15 de marzo, sucede lo siguiente para la hora pico el tiempo transcurrido entre dos llegadas consecutivas fue de 1.5498 segundos y el tiempo promedio de servicio fue de 9.982 segundos, el mínimo de cabinas es de 7 causando 15 vehículos en el sistema y 8 esperando, el tiempo que tardan en el sistema es de 24 segundos y en espera de 14 segundos, el factor de utilización es de 0.92. Considerando el máximo disponible de 11 cabinas sucede lo siguiente el factor de utilización se reduce a 0.58, 6 vehículos en el sistema con un tiempo de espera de 6 segundos y en la cola no existiría ningún automóvil.

El total de cabinas en la plaza de cobro de Tepetzotlán es de 13, pero en el sentido México-Querétaro solo se pueden disponer de un máximo de 8 y 9 para el otro sentido, esto ocurre porque no todas las cabinas son bidireccionales y algunas son exclusivas IAVE. Considerando lo anterior se variaron el número de cabinas abiertas, con las restricciones del mínimo aceptable por el modelo y el máximo dado por las cabinas disponibles para ambos sentidos, para conocer las medidas de desempeño y poder hacer comentarios al respecto. Por lo tanto, para el sentido México-Querétaro, del día 20 de marzo, se manifestó para la hora pico que el número de llegadas por segundo fue de 0.3091, mientras que los servicios por segundo fue de 0.0827, con lo anterior el modelo acepta como mínimo 4 cabinas abiertas con las cuales aproximadamente habría 16 vehículos en el sistema y, por

lo tanto, esperando el servicio habrían 12 vehículos, el tiempo que tendrían que esperar en el sistema es de 51 segundos y en cola de 39 segundos y el factor de utilización es de 0.9341. Si aumentamos el número de cabinas hasta el máximo disponible, es decir hasta 8 cabinas abiertas, los resultados son los siguientes en el sistema habrían 4 vehículos y se podría decir que esperando no habría ninguno, los tiempos se reducirían a 12 segundos en el sistema y no se tendría que esperar para recibir el servicio, el factor de utilización sería de 0.4670.

Para el caso de Querétaro-México del día 22 de marzo, sucede lo siguiente para la hora pico el tiempo transcurrido entre dos llegadas consecutivas fue de 1.8299 segundos y el tiempo promedio de servicio fue de 11.756 segundos, el mínimo de cabinas es de 7 causando 15 vehículos en el sistema y 8 esperando, el tiempo que tardan en el sistema es de 27 segundos y en espera de 16 segundos, el factor de utilización es de 0.92. Considerando el máximo disponible de 9 cabinas sucede lo siguiente el factor de utilización se reduce a 0.71, 7 vehículos en el sistema con un tiempo de espera de 12 segundos y en la cola no existiría ningún automóvil.

Por lo anterior, para ambas plazas de cobro la capacidad actual de ambas es suficiente.

Para saber aproximadamente que ocurriría en los próximos 10 años se tomaron los pronósticos del TDPA de ambas plazas y se modificaron de acuerdo a sus correspondientes factores de corrección; de esta manera se pudieron calcular de manera cercana el número de arribos por unidad de tiempo y con el supuesto de que el número de servicios por unidad de tiempo no varíe dentro de los 10 años. Para el sentido Mex-Cuer el mínimo de cabinas requeridas en el año diez no pasa de 7, lo que significa que no sobrepasa el número disponible de cabinas y para el sentido Mex-Qro sucede lo mismo, es decir, al año diez sólo se requerirá de un mínimo de 7 cabinas abiertas y no sobrepasa el número disponible de ellas.

Para el sentido Cuer-Mex en los primeros 6 años las cabinas disponibles serán suficientes, pero a partir del año siete se tendrá que planear una ampliación de la plaza de cobro, porque ya no será suficiente con las 11 cabinas que se cuentan actualmente. Para el caso de Qro-Mex el número de cabinas disponibles serán suficientes hasta los primeros tres años del pronóstico y a partir del cuarto año se tendrá que preparar una ampliación de la plaza de cobro.⁹

En los períodos de vacaciones se observa una saturación de las plazas de cobro y se podría decir que no es que no soporten el flujo vehicular que se presenta en ellas, si existen problemas es más por el mal uso que se le da al número de cabinas abiertas, así como la ubicación de las mismas; a la falta de señalamientos que permitan al conductor hacer uso de las cabinas que se encuentran más alejadas y que algunos usuarios no pagan con moneda fraccionada, es decir, pagan con billetes de mayor denominación. Además, el

⁹ Ver Anexo C

notorio aumento en el flujo comercial existente entre ambas zonas puede llegar a ocasionar interrupciones en la velocidad del tránsito que se presenta en las plazas de cobro. Si todo esto se mejorara habría posibilidades de no existir saturación de las plazas de cobro.

Finalmente se resalta que este estudio se realizó con una herramienta de Investigación de Operaciones, pero no significa que sea el único camino y el mejor, pero con la realización de este trabajo se pretendió dar una aplicación de Líneas de Espera con datos reales y de México.

ANEXO A: EL MODELO $(M/M/S) : (DG/\infty/\infty)$

Notación:

λ , Número promedio de llegadas al sistema por unidad de tiempo;

μ , Número promedio de servicios por unidad de tiempo;

$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$, Factor de utilización del sistema con un servidor;

S , Número de servidores en el sistema;

$\rho_S = \frac{\lambda}{(S\mu)}$, Factor de utilización del sistema con servidores múltiples;

T_S , Esperanza del tiempo de espera para que se proporcione servicio a la última llegada de la cola;

T_W , Esperanza del tiempo de espera para que la última llegada de la cola abandone el sistema, una vez que se le haya proporcionado el servicio;

$\frac{1}{\lambda}$, Tiempo promedio que transcurre entre dos llegadas consecutivas;

$\frac{1}{\mu}$, Tiempo promedio de servicio de un vehículo;

λ_n , Número esperado de llegadas de nuevos vehículos por unidad de tiempo, cuando ya existen n vehículos en el sistema;

μ_n , Número esperado de servicios por unidad de tiempo, cuando existen n vehículos en el sistema. Representa la tasa combinada de servicios a la cual trabajan todos los servidores ocupados;

L , Valor esperado del número de vehículos formados en la cola;

W , Valor esperado del número de vehículos en el sistema, es decir, esperando en la cola y recibiendo un servicio;

$P_m(t)$, Probabilidad de que en el momento t de arribo en la cola se encuentren m vehículos en el sistema, S recibiendo el servicio, en el caso de S servidores, y $m - S$ formados en la cola;

$P_0(t)$, Probabilidad de que en el momento t de arribo en la cola, el sistema se encuentre vacío;

A.1 UNA LINEA DE ESPERA, SERVIDORES MULTIPLES EN PARALELO, POBLACION INFINITA

Supongamos un sistema con una sola cola, al cual pueden llegar un número infinito de vehículos en espera de recibir un mismo servicio por parte de S ($S > 1$) servidores en paralelo. La política de operación del sistema es que se sirve a los vehículos en el orden de su llegada; el servicio lo proporciona el primer servidor que se haya desocupado. Todos los servidores están desocupados al principio y se irán ocupando en forma progresiva, en la medida en que vayan llegando los vehículos.

El número promedio de llegadas por unidad de tiempo es λ y se supone que éste tiene una distribución de Poisson. El número promedio de servicios de cada servidor por unidad de tiempo es el mismo y se denota por μ . Se supone que este número tiene una distribución exponencial negativa.

Se observa que cuando el número de vehículos en la cola y en las estaciones de servicio, m , es mayor que el número de servidores, S , ($m > S$), la probabilidad de que algún vehículo abandone el sistema después de recibir su servicio, en el intervalo de tiempo Δt , es $S\mu\Delta t$. En caso contrario ($S > m$), dicha probabilidad es $m\mu\Delta t$. Esta observación nos lleva a

$$\begin{aligned}
 P_m(t + \Delta t) &= P_m(t)(1 - \lambda\Delta t)(1 - S\mu\Delta t) \\
 &\quad + P_{m+1}(t)(1 - \lambda\Delta t)(S\mu\Delta t) \\
 &\quad + P_{m-1}(t)(\lambda\Delta t)(1 - S\mu\Delta t) \\
 &\quad + P_m(t)(\lambda\Delta t)(S\mu\Delta t.)
 \end{aligned} \tag{A1}$$

La expresión anterior para $P_{m-1}(t)$ no tiene sentido cuando $m = 0$, por lo que una vez agrupados los términos se obtiene

$$\begin{aligned}
 P_0(t + \Delta t) &= P_0(t) - P_0(t)(\lambda\Delta t) - P_0(t)(S\mu\Delta t) \\
 &\quad + P_0(t)S\mu\lambda(\Delta t)^2 + P_1(t)(S\mu\Delta t) \\
 &\quad - P_1(t)S\mu\lambda(\Delta t)^2 + P_0(t)S\mu\lambda(\Delta t)^2.
 \end{aligned}$$

Restando de ambos lados $P_0(t)$ y dividiendo entre Δt , se tiene

$$\begin{aligned}
 \frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} &= -P_0(t)\lambda - P_0(t)S\mu \\
 &\quad + P_0(t)S\mu\lambda\Delta t + P_1(t)S\mu \\
 &\quad - P_1(t)S\mu\lambda\Delta t + P_0(t)S\mu\lambda\Delta t.
 \end{aligned}$$

Tomando el límite cuando Δt tiende a cero genera

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = -P_0(t)\lambda - P_0(t)S\mu + P_1(t)S\mu = 0.$$

Por lo que

$$P_1(t) = P_0(t) \left(1 + \frac{\lambda}{S\mu} \right). \quad (A2)$$

El límite cuando Δt tiende a cero, de la expresión general (A1), para $m = 1$, genera

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_1(t + \Delta t) - P_1(t)}{\Delta t} = \frac{dP_1(t)}{dt} = 0,$$

donde

$$P_2(t) = \frac{\lambda}{S\mu} P_1(t) + P_1(t) - \frac{\lambda}{S\mu} P_0(t). \quad (A3)$$

Sustituyendo (A2) en (A3) se obtiene

$$P_2(t) = P_0(t) \left[\frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2}{S^2} + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)}{S} + 1 \right]. \quad (A4)$$

Generalizando (A4) para un valor $m - 1$ cualquiera se obtiene

$$P_m(t) = P_0(t) \left[\frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^m}{S^m} + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{m-1}}{S^{m-1}} + \dots + 1 \right],$$

que se puede reescribir para $m > S$ como

$$P_m(t) = \left(\frac{P_0(t)}{S!S^{m-S}} \right) \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^m. \quad (A5)$$

Para el caso en que $m < S$, se sigue el mismo razonamiento cambiando el término $S\mu\Delta t$ de (A1) por $m\mu\Delta t$ para obtener

$$P_m(t) = \frac{P_0(t)}{m!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^m. \quad (A6)$$

Una fórmula explícita de $P_0(t)$ se genera despejando este término de $\sum_{m=0}^{\infty} P_m(t) = 1$, arrojando la expresión

$$P_0(t) = \frac{1}{\sum_{m=1}^{S-1} P_m(t) + \sum_{m=S}^{\infty} P_m(t)}. \quad (A7)$$

Combinando (A7) con (A5) y (A6); y tomando el límite cuando m tiende a infinito se construye la expresión final para $P_0(t)$ dada por

$$P_0(t) = \left[\sum_{m=0}^{S-1} \frac{1}{m!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^m + \frac{1}{S!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^S \frac{S\mu}{(S\mu - \lambda)} \right]^{-1}. \quad (A8)$$

Con estas expresiones se pueden determinar L , W , T_S y T_W . El largo de la cola L , lo dará la expresión

$$L = \sum_{m=S+1}^{\infty} (m - S)P_m(t)$$

que una vez desarrollada, utilizando (A5) y agrupando términos, genera la fórmula

$$L = \frac{\lambda\mu\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^S}{(S-1)!(S\mu - \lambda)^2} P_0(t). \quad (A9)$$

El número de vehículos en el sistema W , es igual a

$$W = L + \frac{\lambda}{\mu}. \quad (A10)$$

El tiempo de espera en la cola T_S , es

$$T_S = \frac{L}{\lambda}. \quad (A11)$$

mientras que el tiempo de espera en el sistema, T_W

$$T_W = T_S + \frac{1}{\mu}. \quad (A12)$$

Se requiere que se cumpla la condición $\frac{\lambda}{S\mu} < 1$ para que no se formen colas de tamaño infinito, la cual se puede reescribir como $\lambda\mu < S$.

Además, se puede demostrar que la probabilidad de que el tiempo de espera en la cola sea mayor a un tiempo h esta dado por

$$P\{T_S > h\} = [1 - P\{T_S = 0\}]e^{-S\mu(1-\rho)h},$$

donde

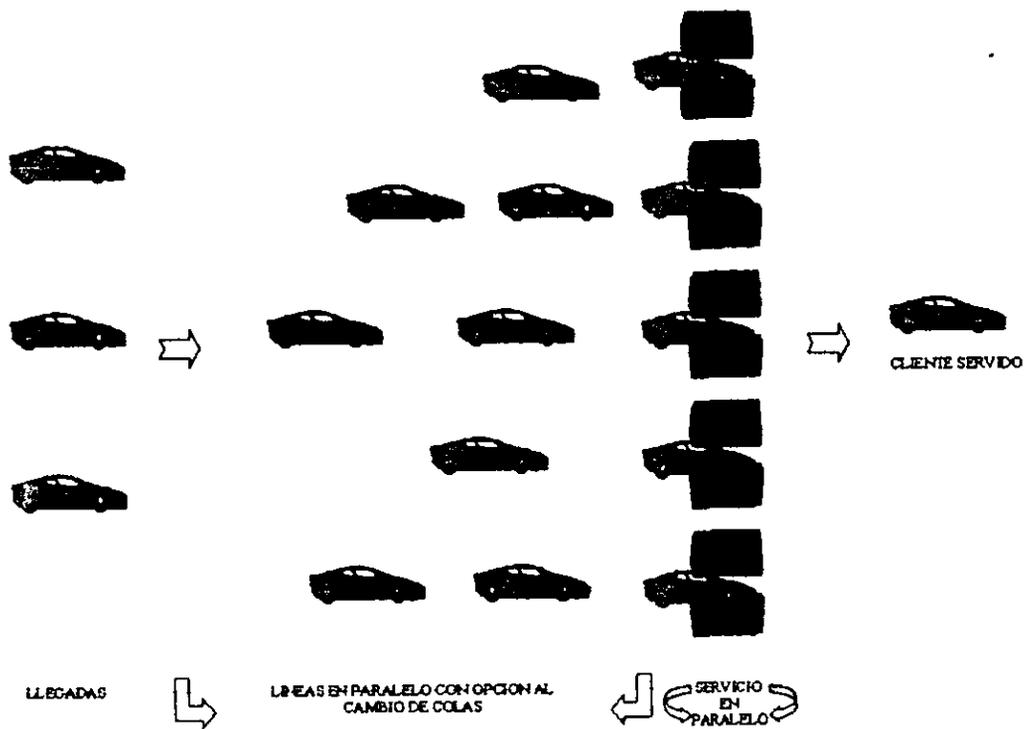
$$P\{T_S = 0\} = \sum_{n=0}^{S-1} P_n.$$

y

$$P\{T_W > Z\} = e^{-\mu Z} \left[\frac{1 + P_0 \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^S}{S!(1-\rho)} 1 - e^{-\mu Z(S-1-\frac{\lambda}{\mu})}}{S - 1 - \frac{\lambda}{\mu}} \right].$$

ANEXO B: DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO

1. Realizar los aforos para el tiempo de servicio utilizando el formato de tiempo de servicio, en caso de existir algún problema en la operación registrarlo en el formato de observaciones en la operación.
2. Realizar los aforos para el tiempo de arribo utilizando el formato de tiempos de arribos, en caso de existir algún observación anotarla.
3. Medir el número promedio de llegadas por segundo λ .
4. Medir el promedio de servicios por segundo μ .
5. Si $\rho = \lambda/\mu > 1$ añadir al sistema más cabinas, S hasta que se logre que el factor de utilización del sistema con servidores múltiples sea menor a uno, es decir, $\rho_s = \lambda/S\mu \leq 1$.
6. Utilizando el modelo $(M/M/S) : (DG/\infty/\infty)$, calcular las medidas de desempeño del estado estacionario (L , T_S , P_W , W , T_W y P_0) para S cabinas (comenzando con la S mínima tal que $\lambda < \mu S$).
7. Variar el número de cabinas S hasta que T_W , el tiempo de espera en el sistema sea muy próximo a $1/\mu$, o S sea el número máximo de cabinas.
8. El número óptimo de cabinas será el que tenga el tiempo de espera en el servicio igual al deseado (p.e. si se desea esperar a lo más 3 minutos, se detiene el proceso cuando $T_W = 180$).
9. Se hará el mismo procedimiento para cada intervalo de tiempo.



ANEXO C: RESULTADOS

México-Cuernavaca 13/03/98

De las 17:00 horas a las 18:00 horas, $(\frac{1}{\lambda}) = 3.1533$ seg, $(\frac{1}{\mu}) = 11.675$ seg

S	ρ_s	W	L	TW	TS	P ₀	PW
4	0.9256	14.1583	10.4558	44.6454	32.9704	0.0079	0.8402
5	0.7404	4.9727	1.2702	15.6806	4.0056	0.0199	0.4451
6	0.6170	4.0527	0.3503	12.7795	1.1044	0.0233	0.2174
7	0.5289	3.8118	0.1094	12.0199	0.3448	0.0243	0.0974
8	0.4628	3.7369	0.0345	11.7837	0.1087	0.0245	0.0400

Cuernavaca-México 15/03/98

De las 20:00 horas a las 21:00 horas, $(\frac{1}{\lambda}) = 1.5498$ seg, $(\frac{1}{\mu}) = 9.982$ seg

S	ρ_s	W	L	TW	TS	P ₀	PW
7	0.9201	15.3414	8.9005	23.7761	13.7941	0.0007	0.7727
8	0.8051	8.3771	1.9362	12.9828	3.0008	0.0012	0.4687
9	0.7156	7.1196	0.6787	11.0339	1.0519	0.0015	0.2697
10	0.6441	6.7064	0.2655	10.3935	0.4115	0.0015	0.1467
11	0.5855	6.5473	0.1064	10.1469	0.1649	0.0016	0.0753

México-Querétaro 20/03/98

De las 17:00 horas a las 18:00 horas, $(\frac{1}{\lambda}) = 3.2353$ seg, $(\frac{1}{\mu}) = 12.088$ seg

S	ρ_s	W	L	T_w	T_s	P_0	P_w
4	0.9341	15.8900	12.1537	51.4089	39.3200	0.0070	0.8578
5	0.7473	5.0873	1.3510	16.4591	4.3710	0.0190	0.4570
6	0.6227	4.1068	0.3705	13.2868	1.1987	0.0224	0.2245
7	0.5338	3.8522	0.1160	12.4632	0.3751	0.0234	0.1013
8	0.4670	3.7730	0.0367	12.2069	0.1188	0.0237	0.0419

Querétaro-México 22/03/98

De las 19:00 horas a las 20:00 horas, $(\frac{1}{\lambda}) = 1.8299$ seg, $(\frac{1}{\mu}) = 11.756$ seg

S	ρ_s	W	L	T_w	T_s	P_0	P_w
7	0.9178	14.9790	8.5546	27.4101	15.6541	0.0007	0.7665
8	0.8030	8.3173	1.8929	15.2199	3.4638	0.0013	0.4642
9	0.7138	7.090	0.6651	12.9732	1.2171	0.0015	0.2667

Cuernavaca-México 15/03/98

De las 20:00 horas a las 21:00 horas, $\mu = 0.10018$

λ	S_m^*	W_m	L_m	T_{W_m}	T_{S_m}	W_{m+1}	L_{m+1}	$T_{W_{m+1}}$	$T_{S_{m+1}}$
0.7795	8	40.22	32.44	51.59	41.61	11.53	3.75	14.79	4.81
0.7988	8	307.32	299.34	384.73	374.74	12.98	5.01	16.25	6.27
0.8190	9	15.19	7.02	18.55	8.57	11.53	3.75	14.79	4.81
0.8398	9	18.93	10.55	22.55	12.56	10.97	2.59	13.06	3.08
0.8616	9	26.95	18.35	31.28	21.29	12.01	3.41	13.95	3.96
0.8842	9	56.24	47.42	63.61	53.63	13.47	4.64	15.24	5.25
0.9077	10	15.68	6.62	17.28	7.29	11.13	2.07	12.26	2.28
0.9322	10	19.51	10.21	20.93	10.95	12.05	2.74	12.92	2.94
0.9576	10	27.87	18.31	29.10	19.12	13.29	3.73	13.88	3.89
0.9841	10	61.88	52.06	62.88	52.90	15.10	5.28	15.35	5.36

*m el número mínimo de cabinas abiertas

Querétaro-México 22/03/98

De las 19:00 horas a las 20:00 horas, $\mu = 0.085062$

λ	S_m^*	W_m	L_m	T_{W_m}	T_{S_m}	W_{m+1}	L_{m+1}	$T_{W_{m+1}}$	$T_{S_{m+1}}$
0.6261	8	16.07	8.71	25.67	13.91	9.48	2.12	15.14	3.38
0.6490	8	25.25	17.62	38.91	27.15	10.66	3.03	16.42	4.67
0.6727	8	91.01	88.10	135.30	123.54	12.43	4.53	18.49	6.73
0.6975	9	15.54	7.34	22.28	10.52	10.27	2.07	14.72	2.97
0.7232	9	22.46	13.96	31.06	19.30	11.51	3.01	15.91	4.16
0.7500	9	53.69	44.87	71.59	59.83	13.40	4.59	17.87	6.12
0.7778	10	16.74	7.60	21.53	9.77	11.42	2.27	14.68	2.92
0.8067	10	24.54	15.06	30.43	18.67	12.88	3.40	15.97	4.21
0.8368	10	66.84	57.00	79.87	68.12	15.22	5.38	18.19	6.43
0.8681	11	19.73	9.53	22.73	10.98	13.01	2.81	14.99	3.24

*m el número mínimo de cabinas abiertas

REFERENCIAS

- Altiook, T., 1987, Queues with Group Arrivals and Exhaustive Service Discipline: Queueing Systems 2, pp. 307-320.
- Budnick, F.S., R. Mojena and T.E. Vollmann, 1977, Principles of Operation Research for Management, Irwin-Dorsey Limited, pp. 636-695.
- Cal, R. y M. y J. Cárdenas, 1994, Introducción a la Investigación de Operaciones, McGraw Hill, pp. 397-481.
- Cooper R.B., Introduction to Queueing Theory, McMillan 1972.
- CAPUFE, Aforo e Ingreso, Anuario Estadístico, 1993.
- CAPUFE, Aforo e Ingreso, Anuario Estadístico, 1994.
- CAPUFE, Aforo e Ingreso, Anuario Estadístico, 1995.
- CAPUFE, Aforo e Ingreso, Anuario Estadístico, 1996.
- Cooper, R.B., 1976, Queues With Ordered Servers That Work at Different Rates, Operations Research 13, pp. 69-78.
- Cruon R., Queueing Theory. Recent Developments and Applications, American Elsevier, 1967.
- Henderson, W., 1972, Alternative Approaches to the Analysis of $M/G/1$ and $G/M/1$ Queues. J. Oper. Res. Soc. Japan 15, pp. 92-101.
- Heyman, D.P. and S. Stidham, 1980, The Relation Between Customer Average and Time Average in Queues, pp. 983-941.
- Hillier, F. and G.J. Lieberman, 1994, Introducción a la Investigación de Operaciones, McGraw Hill, pp. 397-481.
- J. Medhi, 1991, Stochastic Models in Queueing Theory, Academic Press Inc., pp. 301-305.
- Kaufmann A., 1977, Métodos y Modelos de Investigación de Operaciones, Vol. I, CECSA, pp. 393-426.
- Kendall, D.G., 1953, Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and Their Analysis by the method of imbedded Markov Chains. Ann. Math. Statist. 24, pp. 338-354.
- Khintchine A. Y., Mathematical Methods in the Theory of Queues, Hafner Publishing Co. 1969.
- Levy, Y., and Yechiali, U., 1976, $M/M/s$ Queues With Server Vacations. INFOR, 14, pp. 153-163.
- Newel, G.F., 1971, Applications of Queueing Theory, Chapman and Hall, London.
- O'Brien, G.G., 1954, Some Queueing Problems, J. Soc. Ind. Appl. Math. 2, pp. 134.
- Prawda W.J., 1980, Métodos y modelos de Investigación de Operaciones, Vol. II, Limusa, pp. 243-313.

- Parabhu, N.U. and Bhat, U.N., 1963, Some First Passage Problems and Their Arrivals. Opns. Res. 11, pp. 380-386.
- Programa Nacional para la Modernización de la Infraestructura Carretera, 1991, SCT, Subsecretaría de Infraestructura.
- Programa de Concesión de Obras de Cuota a la Inversión Privada, 1989, SCT, Subsecretaría de Infraestructura.
- Reyes Spíndola, R. C-M y Cárdenas G. J., 1994, Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y Aplicaciones, Alfaomega, pp. 151-200.
- Taha H.A., 1992, Investigación de Operaciones, Alfaomega, pp. 636-695.
- Van Doorn, E., 1981, Stochastic Monotonicity and Queueing Applications in Birth Death Processes. Lecture Notes in Statistics, No. 4, Springer-Verlag. New York.
- Wolf, R.W., 1982, Poisson Arrivals See Time Average, Opns. Res. 30, pp. 223-231.
- Wright Paul H., 1993, Ingeniería de carreteras, Limusa, pp. 132-141.