

12



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

TEORÍA DE RESTRICCIONES, JUSTO A TIEMPO Y  
TEORÍA DE COLAS COMO METODOLOGÍA PARA LA  
SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA VIAL

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO INDUSTRIAL  
P R E S E N T A N :  
R I C A R D O E N D O C R U Z  
A D R I A N A E L I Z A B E T H G A R C Í A B A R R A G Á N

DIRECTOR DE TESIS: M.A. GONZALO GUERRERO ZEPEDA



CIUDAD UNIVERSITARIA,

OCTUBRE DEL 2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

# INDICE

---

Introducción	2
Objetivo	4
I. Generalidades	5
II. Definición del problema	10
II.1 Descripción de la zona de estudio	10
II.2 Diagnóstico presuncional	13
II.3 Análisis del problema	14
III. Metodología	21
III.1 Sistemas de producción	21
III.2 Sistemas de producción empujar	23
III.3 Sistemas de producción jalar	25
III.4 Planeación y control de la producción integrada	28
III.5 Investigación de operaciones	29
IV. Desarrollo	32
IV.1 Teoría de colas	32
IV.1.1 Estructura básica de un modelo de colas	33
IV.1.2 Análisis probabilístico de la teoría de colas	35
IV.1.3 Análisis determinístico de la teoría de colas	41
IV.2 Justo tiempo (JIT)	46
IV.2.1 Alternativas de solución fundamentadas en un sistema JIT	55
IV.3 Teoría de restricciones (TOC)	58
IV.3.1 Alternativas de solución fundamentadas en un sistema TOC	63

---

V.	Resultados	72
	V.1 Definición del problema	72
	V.2 Teoría de colas	73
	V.3 Justo a tiempo	75
	V.4 Teoría de restricciones	78
	V.5 Justificación económica	80
VI.	Conclusiones y recomendaciones	95
	Bibliografía	99
	Anexo 1	
	Fotografía aérea de la zona de estudio. Abril 2001	102
	Anexo 2	
	Imágenes de Av. Insurgentes sentido norte a sur cruce con el paradero de microbuses en la calle Dr. Gálvez a la hora de máxima demanda de tránsito vehicular	104
	Anexo 3	
	Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal Artículos 6, 10, 18 y 34	105
	Anexo 4	
	Costos de obra en aceras y carpeta asfáltica	106
	Costos por reubicación de postes telefónicos	
	Costos por reubicación de postes de alumbrado	107

---

# INTRODUCCIÓN

A lo largo de la carrera se ha abarcado una amplia variedad de materias y el desarrollo de diversos temas ha dado una visión amplia, con capacidad de síntesis y análisis.

La ambición es hacer un trabajo que tenga una conclusión práctica, que resuelva problemas y sea aplicable a corto plazo. Con este principio se buscó un problema cuya solución diera una satisfacción no solamente personal, sino que mientras más personas se beneficien de la solución de ese problema, más razón de ser tendrá el desarrollo de un trabajo.

En la búsqueda de temas que llevaran a obtener soluciones aplicables a la realidad, contribuyendo al bienestar de la sociedad, surgió la idea de desarrollar un trabajo que ayudara a mejorar la vialidad en la ciudad, haciendo una analogía entre el flujo vial con una línea de producción y aplicando herramientas de la ingeniería industrial para obtener una alternativa de solución en un tramo conflictivo.

La ciudad de México se ve afectada todos los días por un intenso tránsito en diversos puntos, lo cual representa un problema para todos los habitantes de esta ciudad, ocasionando pérdidas de tiempo, contaminación, desperdicio de combustible, inseguridad, estrés y pérdidas económicas. El hecho de encontrar alternativas y/o técnicas para aumentar la fluidez del tránsito en la ciudad de México es algo que para muchos sería la solución a uno de los problemas importantes de la misma.

El incremento de la actividad económica y de la población en la ciudad de México ha ocasionado que los medios y las vías de comunicación sean insuficientes y que un mayor número de viajes se realicen por las mismas. Resulta prácticamente imposible la construcción de más arterias viales, lo que conlleva a hacer más eficientes las que ya existen.

Se pretende buscar una técnica que permita dar una solución de naturaleza ingenieril (eficiente, eficaz y económica) a un punto de conflicto en la ciudad de México.

Sería muy costoso y llevaría mucho tiempo el hacer un análisis de toda la ciudad, pero como futuros profesionales se tiene interés en contribuir a mejorarla, al menos en un punto de conflicto y poder aplicar los conocimientos en favor de la sociedad con un proyecto que sea económicamente viable y que realmente funcione.

El presente trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera: en el primer capítulo se definen conceptos propios de la ingeniería de tránsito. En el segundo capítulo se definen y analizan los problemas viales en el tramo bajo estudio, presentando el resultado de la investigación de campo. En el tercer capítulo se determinan los métodos que se utilizarán en la solución del problema así como su justificación. El cuarto capítulo presenta la descripción de los métodos a utilizar, la analogía de variables y el desarrollo de los métodos seleccionados. El quinto capítulo muestra los resultados, junto con un análisis económico que busca determinar la viabilidad del proyecto. Se finaliza con la presentación de conclusiones y recomendaciones en el capítulo seis.

## **OBJETIVO**

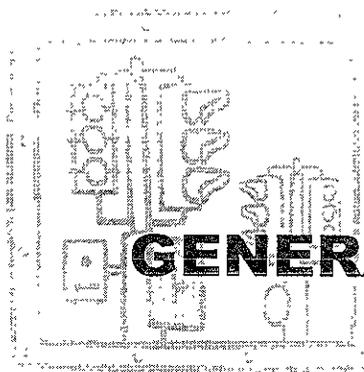
Proponer una alternativa de solución para mejorar la vialidad en Avenida Insurgentes, del tramo ubicado entre las calles Loreto y Río San Ángel, utilizando técnicas propias de la ingeniería industrial.

El presente trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera: en el primer capítulo se definen conceptos propios de la ingeniería de tránsito. En el segundo capítulo se definen y analizan los problemas viales en el tramo bajo estudio, presentando el resultado de la investigación de campo. En el tercer capítulo se determinan los métodos que se utilizarán en la solución del problema así como su justificación. El cuarto capítulo presenta la descripción de los métodos a utilizar, la analogía de variables y el desarrollo de los métodos seleccionados. El quinto capítulo muestra los resultados, junto con un análisis económico que busca determinar la viabilidad del proyecto. Se finaliza con la presentación de conclusiones y recomendaciones en el capítulo seis.

## **OBJETIVO**

Proponer una alternativa de solución para mejorar la vialidad en Avenida Insurgentes, del tramo ubicado entre las calles Loreto y Río San Ángel, utilizando técnicas propias de la ingeniería industrial.

---



# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

La ingeniería de tránsito es la especialización de la ingeniería a la que concierne específicamente el aspecto funcional de la vialidad, la que tiene que ver con el movimiento de vehículos y peatones. Como ingenieros industriales se pretende dar un nuevo enfoque a la ingeniería de tránsito y encontrar una solución innovadora a un problema de tránsito

La ingeniería de transporte es la “aplicación de los principios tecnológicos y científicos a la planeación, al proyecto funcional, a la operación y a la administración de las diversas partes de cualquier modo de transporte con el fin de proveer la movilización de personas y mercancías de una manera segura, rápida, confortable, conveniente, económica y compatible con el medio ambiente”.<sup>1</sup>

La ingeniería de tránsito es “aquella fase de la ingeniería de transporte que tiene que ver con la planeación, el proyecto geométrico y la operación

---

<sup>1</sup> Institute of Transportation Engineers. Membership Directory, Washington.D.C., 1991.

del tránsito por calles y carreteras, sus redes, terminales, tierras adyacentes y su relación con otros modos de transporte”.<sup>2</sup>

Los tres elementos básicos que componen la ingeniería de tránsito son: el usuario (peatones y conductores), el vehículo y la vialidad (calles y carreteras).

La Ingeniería de tránsito y de transporte, a diferencia de otras disciplinas de la ingeniería, trata no sólo con problemas que dependen de factores físicos o técnicos, sino también con aquellos que frecuentemente presenta el comportamiento de los conductores de vehículos y de los peatones.

El proyecto geométrico de calles y carreteras, “es el proceso de correlación entre sus elementos físicos y las características de operación de los vehículos, mediante el uso de las matemáticas, la física y la geometría”.<sup>3</sup>

La Ingeniería de tránsito analiza lo siguiente:

1. Características del tránsito. Se analizan los diversos factores y las limitaciones de los vehículos y los usuarios como elementos de la corriente de tránsito. Se investigan la velocidad, el volumen y la densidad; el origen y el destino del movimiento; la capacidad de

---

<sup>2</sup> Bis 1

<sup>3</sup> Cárdenas G., James. *Diseño Geométrico de Vías*, Ecoe Ediciones, Universidad del Valle, Colombia, 1993.

las calles y carreteras; el funcionamiento de pasos a desnivel, terminales, intersecciones canalizadas; se analizan los accidentes y otras incidencias. Se estudia al usuario particularmente desde el punto de vista psíquico-físico, indicándose la rapidez de las reacciones para frenar, para acelerar, para maniobrar, su resistencia al cansancio, etc.

2. Reglamentación del tránsito. Se establecen las bases para los reglamentos del tránsito; deben señalarse sus objetivos, legitimidad y eficacia, así como las objeciones, sanciones y procedimientos para modificarlos y mejorarlos. Se da atención a aspectos como prioridad de paso, zonificación de la velocidad, limitaciones en el tiempo de estacionamiento, control policiaco en las intersecciones, etc.
3. Señalamiento y dispositivos de control. Se determinan los proyectos, construcción, conservación y uso de las señales, iluminación, dispositivos de control, etc.
4. Planificación vial. Se realizan investigaciones y se analizan los diferentes métodos para planificar la vialidad, para poder adaptar el desarrollo de las calles y carreteras a las necesidades del tránsito.

5. Administración. Se examinan las relaciones entre las distintas dependencias públicas que tienen competencia en materia vial y su actividad administrativa al respecto.

Existen tres tipos de solución al problema del tránsito: <sup>4</sup>

- I. *Solución integral*, que es una solución casi imposible de aplicar en las ciudades actuales, y que consiste en construir nuevos tipos de vialidades que sirvan a los nuevos vehículos, hacer ciudades con trazo nuevo, revolucionario.
- II. *Solución parcial de alto costo*, que equivale a sacar el mejor partido posible de lo que actualmente se tiene, con ciertos cambios necesarios que requieren fuertes inversiones, como ensanchamiento de calles, creación de intersecciones canalizadas, sistemas de control automático con semáforos, etc.
- III. *Solución parcial de bajo costo*, que consiste en el aprovechamiento máximo de las condiciones existentes, con el mínimo de obra material y el máximo en cuanto a regulación funcional del tránsito, a través de técnicas depuradas, así como disciplina y educación por

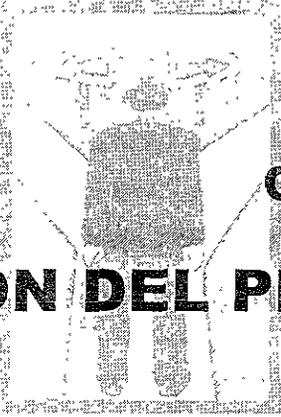
---

<sup>4</sup> CAL Y MAYOR, Rafael, et -al, *Ingeniería de tránsito*, edit. Alfaomega, México, 1994, 7ª. Edición

parte del usuario. Incluye: medidas necesarias de educación vial, señales de tránsito apropiadas y semáforos, legislación y reglamentación adaptadas a las necesidades del tránsito, estacionamiento de tiempo limitado, etc.

En el presente trabajo se buscará obtener una solución del tipo III, es decir, una solución parcial de bajo costo que como lo indica la definición busca el aprovechamiento máximo de las condiciones existentes.

---



## **CAPÍTULO II**

# **DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Las ciudades dependen en gran medida de sus sistemas de calles y se sabe que en ciertas horas del día dichos sistemas tienen que operar por arriba de su capacidad con el fin de satisfacer los incrementos de la demanda en sus servicios de transporte, ya sea para tránsito de vehículos livianos, tránsito comercial, transporte público, acceso a las distintas propiedades o estacionamientos, etc., originando obvios problemas de tránsito. Este es el caso del tramo en estudio sobre la Avenida Insurgentes, de la calle Loreto a Río San Ángel.

### **II.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

*Datos geográficos:* La zona de estudio se encuentra localizada en la zona sur de la ciudad de México, dentro de la Delegación Álvaro Obregón. En el Anexo 1 se muestra una fotografía aérea de la zona de estudio.

En la figura 2.1 se muestra un mapa del tramo en estudio (Av. Insurgentes entre la calle Loreto y Río San Ángel), con sus calles aledañas.

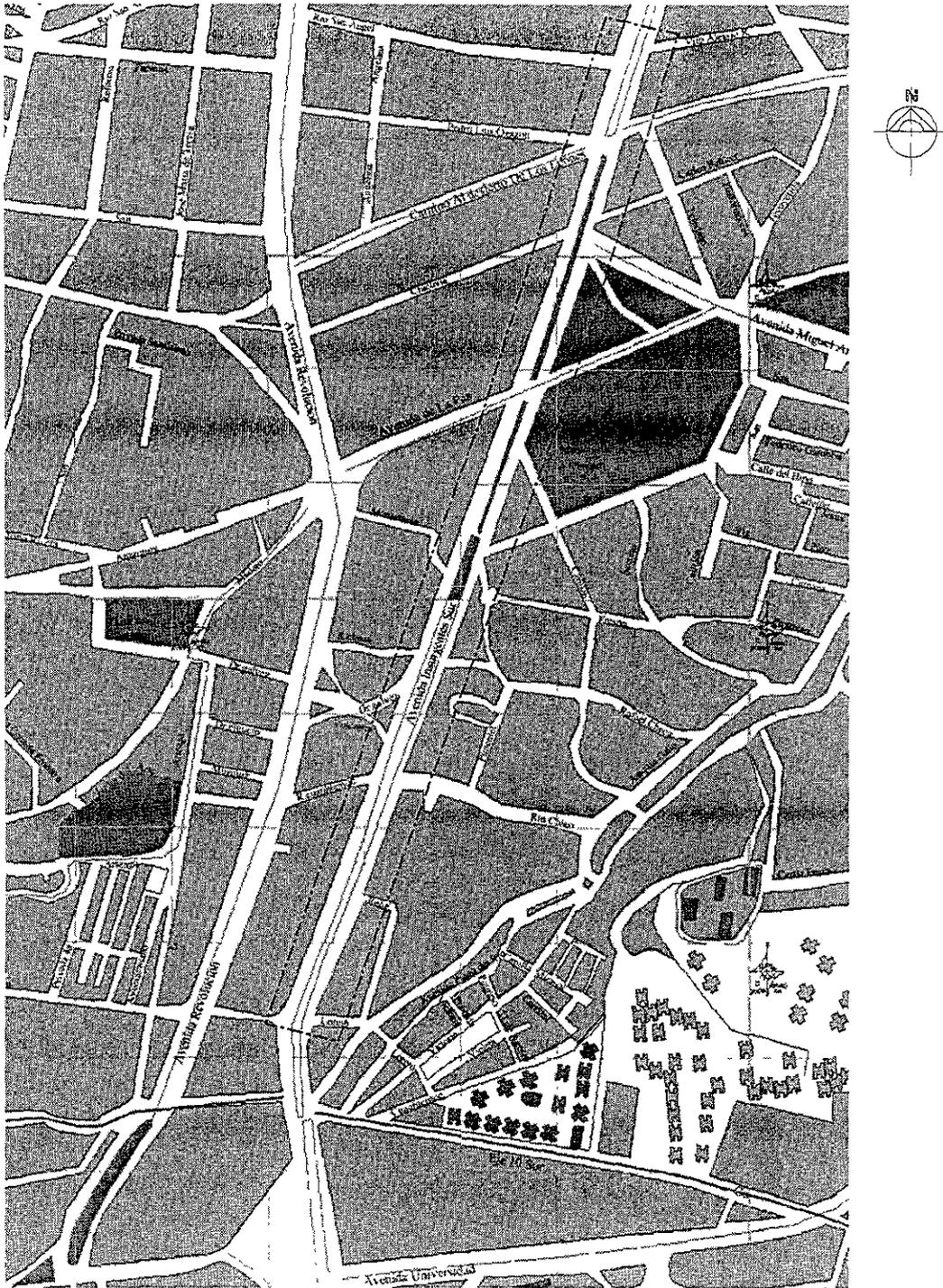


Figura 2.1  
Mapa de la zona de estudio  
Av. Insurgentes entre las calles Loreto y Río San Ángel con sus zonas aledañas

*Mobiliario Urbano:* La zona de estudio cuenta con paradas para autobuses, iluminación en ambas aceras, señalamientos horizontales y verticales; está dotada de casetas telefónicas, puestos de revistas y una gasolinera.

*Usos de suelo:* La intersección cuenta con un uso de suelo mixto, predominando el uso habitacional con comercio y habitacional con oficinas, así como espacios abiertos como el Jardín de la Bombilla, donde se encuentra el Monumento a Álvaro Obregón y la Plaza 17 de Julio, además del centro comercial Plaza Inn y numerosos restaurantes.

El Programa Delegacional de Desarrollo Urbano en la Delegación Álvaro Obregón, establece que el uso del suelo predominante es urbano habitacional y habitacional mixto, compuesto de viviendas, comercios, oficinas, servicios e industria no contaminante<sup>5</sup>.

*Condiciones del pavimento:* Considerada como parte de la red primaria de vialidad en el Distrito Federal, la Avenida Insurgentes presenta una cinta asfáltica buena a pesar de presentar un tránsito alto diario, causa que obliga a tener un mayor mantenimiento cada año.

*Condiciones de infraestructura de servicios:* La infraestructura actual en la zona de estudio presenta áreas comerciales, oficinas, sucursales bancarias, restaurantes y áreas verdes.

---

<sup>5</sup> Proyecto Intersección de Flujo Continuo, marzo/2000. Dirección General de Obras Públicas del Gobierno del Distrito Federal.

## II.2 DIAGNÓSTICO PRESUNCIONAL

Por la mañana las horas de máxima demanda se observaron de las 7:30 a las 9:30 horas en el sentido de sur a norte. Se encontró un posible cuello de botella en el punto de Avenida Insurgentes en su cruce con la calle de Vito Alessio Robles, debido a los automóviles que toman la calle Río San Ángel para salir a la Avenida Revolución. Otro problema de tránsito se observó en Av. La Paz debido al transporte público que se estaciona sobre Av. Insurgentes, en su mayoría microbuses.

Por la tarde, las horas de máxima demanda se observaron de las 18:00 a las 21:30 horas en el sentido de norte a sur, donde los posibles cuellos de botella sobre la avenida Insurgentes se localizaron en el cruce con Miguel Ángel de Quevedo y en el paradero de microbuses de San Ángel situado a la altura de la calle Dr. Gálvez. El primer cuello de botella se debe a los automóviles que circulan sobre Avenida Insurgentes de norte a sur y dan vuelta a la izquierda para tomar Miguel Ángel de Quevedo, bloqueando con este movimiento dos carriles de Av. Insurgentes. El segundo cuello de botella se da por la falta de respeto de los conductores, especialmente de microbuses, al espacio existente.

### **II.3 ANÁLISIS DEL PROBLEMA**

Para conocer todos los aspectos que influyen en la operación de la zona de estudio se realizó una investigación de campo para obtener estadísticas actualizadas que permitan tener una perspectiva real del problema. Esta investigación de campo es de elaboración propia y fue llevada a cabo en días hábiles representativos de la semana. Se consideraron como días representativos aquellos donde no existan factores que afecten el funcionamiento ordinario de las calles, tales como manifestaciones, plantones, accidentes graves o concentraciones masivas de gente (partidos de fútbol).

También se consideró que la toma de datos se realizara en periodos ordinarios de labores escolares para todos los niveles educativos, buscando tener estadísticas del flujo vehicular más representativo a lo largo del año.

El método empleado para la toma de datos fue manual con el apoyo de cámaras de video para poder realizar conteos simultáneos en distintos puntos a la misma hora.

La descripción del problema sigue los siguientes pasos:

1. Limitar la zona de estudio estableciendo un sistema con sus barreras, entradas y salidas (Figura 2.2).

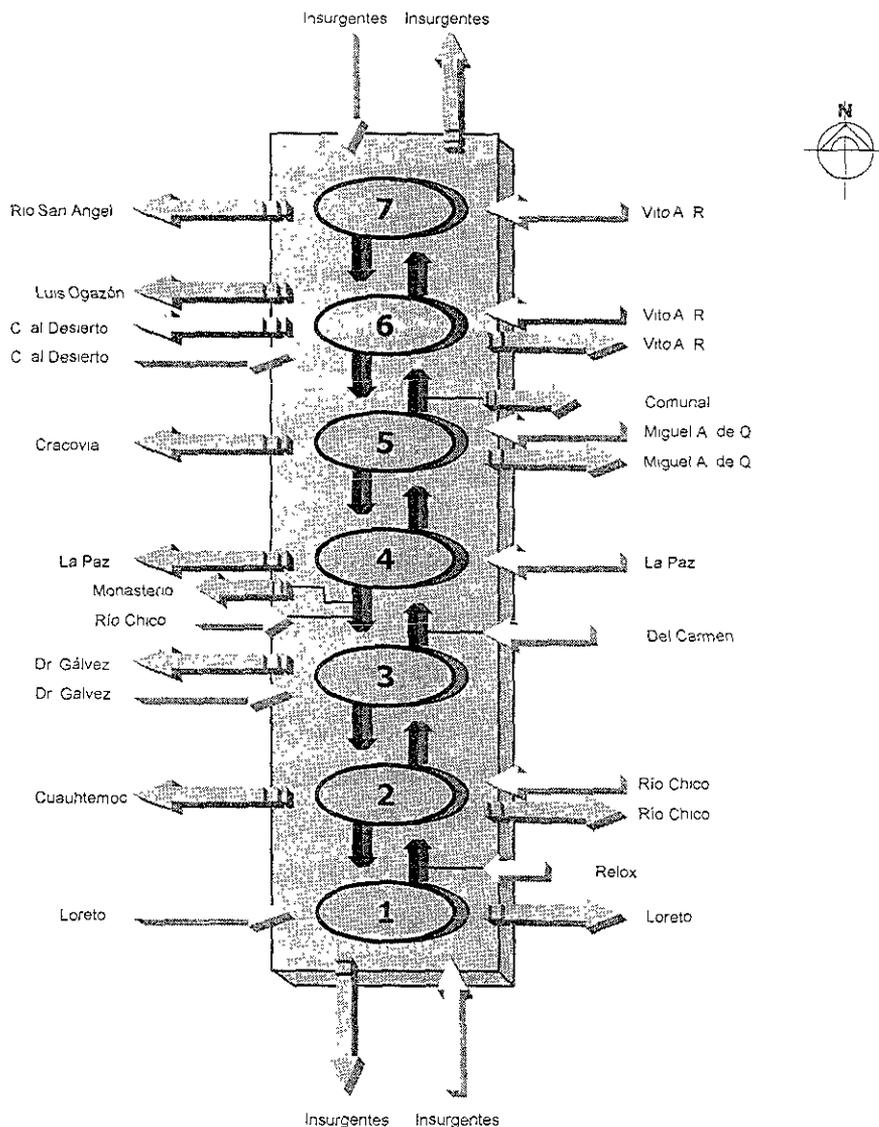
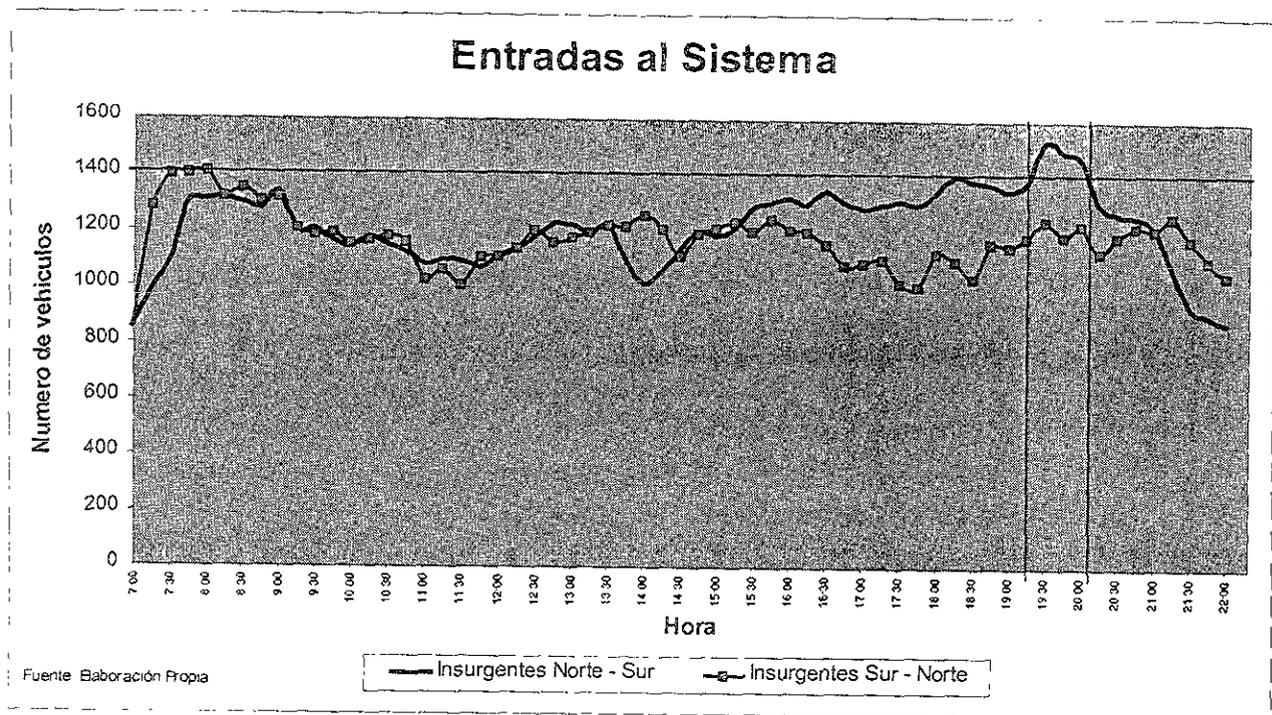


Figura 2.2  
Diagrama del sistema  
Entradas y salidas de Av. Insurgentes entre las calles Río San Ángel y Loreto.  
Los números representan los cruces y las flechas el sentido de circulación.

## 2. Determinar la hora de máxima demanda en el sistema.

Se consideró que los dos accesos con mayor demanda al sistema son por Avenida Insurgentes en sus dos sentidos. Se realizó el muestreo, durante una semana, en los cruceros 1 y 7 para determinar la demanda de vehículos que entran al sistema por estos accesos cada 15 minutos en el rango de 7:00 a 22:00 horas. Los resultados se presentan en la gráfica 2.3 en lapsos de 30 minutos para facilidad de visualización.



Gráfica 2.3  
Demanda vehicular sobre Av. Insurgentes

La hora de máxima demanda al sistema se da en Av. Insurgentes, sentido norte a sur de las 19:15 a las 20:15 horas, con una demanda promedio de 2754 vehículos por hora.

3. Determinar los cruceros más conflictivos del sistema a la hora de máxima demanda.

Para determinar cuál es el cruce más conflictivo se realizó un estudio de capacidad y demanda con el objeto de determinar el porcentaje de uso de cada cruce, es decir, se comparó el porcentaje de uso de cada uno de los siete cruces a partir de la fórmula:

$$\% \text{ de uso} = \frac{\text{demanda}}{\text{capacidad}} \times 100$$

- ♦ La demanda se considera como el número de vehículos que desean hacer uso de un cruce en determinado tiempo. Se obtuvo en tiempo real a la hora de máxima demanda de las 19:15 a las 20:15 horas.
- ♦ La capacidad es el número de vehículos que puede atender un cruce en determinado tiempo. Para obtener este dato se midió el número máximo de vehículos que pueden pasar por un cruce. Este dato no necesariamente se da a la hora de máxima demanda y se cuantificó considerando momentos en que el cruce no estuviera saturado.

El estudio únicamente se enfocó en Av. Insurgentes sentido norte a sur por ser el tramo con máxima demanda, como se demostró en el punto 2. También se omitieron las entradas y salidas al sistema de las calles Relox,

Río Chico, Rafael Checa, Monasterio, Del Carmen, Comunal y Luis Ogazón ya que el flujo vehicular que circula por estas calles es mínimo y se considera despreciable. Un diagrama del sistema analizado se muestra en la figura 2.4. Los resultados se presentan en la Tabla 2.5.

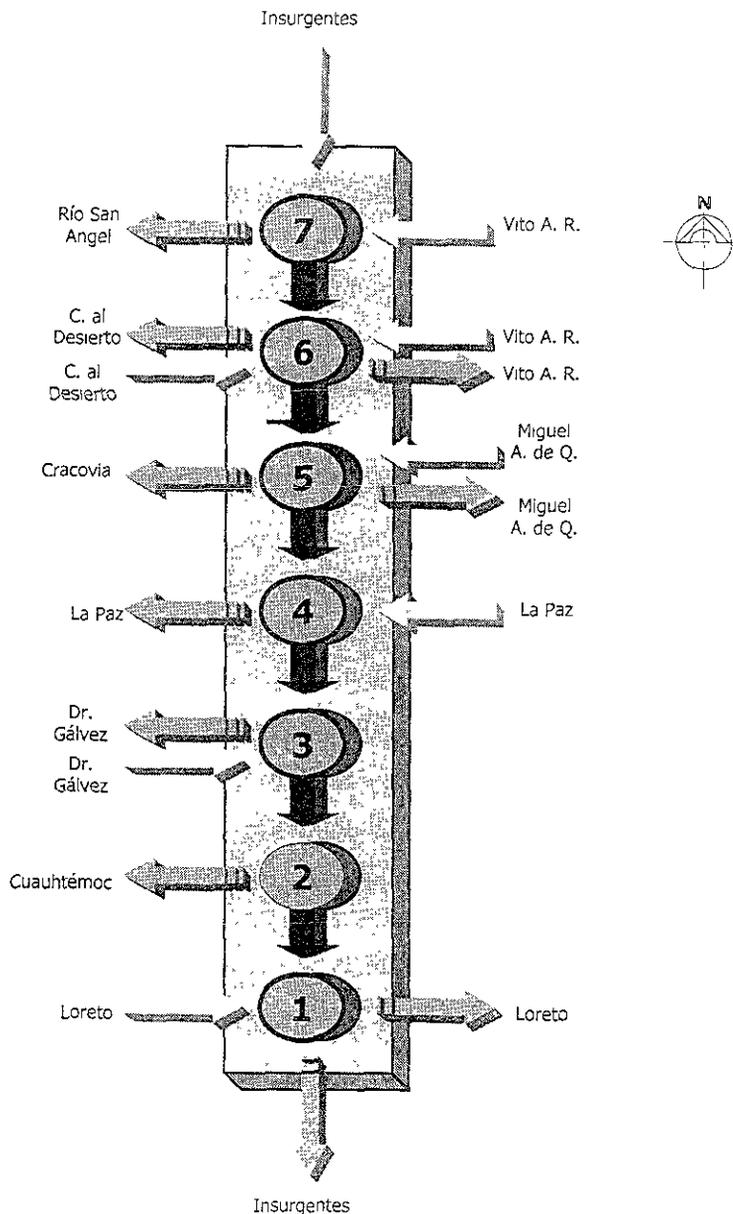


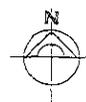
Figura 2 4

Diagrama del sistema en su sentido de máxima demanda (norte a sur)  
Entradas y salidas de Av. Insurgentes entre las calles Río San Ángel y Loreto

TABLA 2.5

Capacidad, demanda y porcentaje de uso de cada cruceiro en la hora de máxima demanda vehicular (19:15 a 20:15 horas) de Av. Insurgentes entre las calles Río San Ángel y Loreto

		CRUCERO						
		1	2	3	4	5	6	7
Descripción del Movimiento	A							
	B							
	C		-					
	D		-	-				
	E	-	-	-	-			-
	F	-	-	-	-	-		-
	G	-	-	-	-	-		-
Capacidad	A	96	180	80	496	192	656	460
	B	2392	2400	1859	2320	400	60	2580
	C	100	-	160	240	2292	2396	504
	D	280	-	-	136	180	392	432
	E	-	-	-	-	88	156	-
	F	-	-	-	-	-	320	-
	G	-	-	-	-	-	600	-
Demanda	A	16	120	88	348	52	364	184
	B	2336	2352	2260	2272	456	52	2492
	C	56	0	168	216	2528	2440	268
	D	244	0	0	120	192	304	364
	E	0	0	0	0	92	128	0
	F	0	0	0	0	0	336	0
	G	0	0	0	0	0	468	0
% DE USO	A	17%	67%	110%	70%	27%	55%	40%
	B	98%	98%	122%	98%	114%	87%	97%
	C	56%	-	105%	90%	110%	102%	53%
	D	87%	-	-	88%	107%	78%	84%
	E	-	-	-	-	105%	82%	-
	F	-	-	-	-	-	105%	-
	G	-	-	-	-	-	78%	-



Las flechas que indican la descripción del movimiento (A, B, C, D, E, F y G) se refieren a las trayectorias que siguen los automóviles al pasar por cada cruce (1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7). Por ejemplo, el cruce 3 en combinación con la descripción del movimiento B ( $\downarrow$ , para el caso de la coordenada 3B) se refiere a los automóviles que viniendo sobre Av. Insurgentes de norte a sur siguen una trayectoria recta al pasar por el cruce 3 (Dr. Gálvez, según Fig. 2.4). De igual manera, la descripción del movimiento de la coordenada 5E ( $\curvearrowright$ ) se refiere a los automóviles provenientes del lado este del cruce 5 (Miguel Ángel de Quevedo) que dan vuelta sobre Av. Insurgentes hacia el sur. Los resultados de capacidad y demanda mostrados en la Tabla 2.5 son el promedio aritmético de cuatro muestras tomadas para cada movimiento en los siete cruces.

En resumen, el principal problema vial de la Av. Insurgentes entre las calles Loreto y Río San Ángel se da entre las 19:15 y 20:15 horas en sentido Insurgentes de norte a sur, en el cruce con la calle Doctor Gálvez.

En este punto los vehículos que circulan sobre Av. Insurgentes tienen un exceso en volumen del 22% respecto del volumen de vehículos que pueden circular (Tabla 2.5).

El segundo punto más conflictivo a la misma hora y en el mismo sentido es el cruce con Miguel Ángel de Quevedo, debido a que los vehículos que circulan por Insurgentes y desean dar vuelta en Miguel Ángel de Quevedo rebasan en 14% el volumen de vehículos que pueden realizar este movimiento.

---

## CAPÍTULO III

# METODOLOGÍA

### III.1 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

En el sentido más amplio, *un sistema de producción es cualquier actividad que produzca algo, es aquello que toma un insumo y lo transforma en una salida o producto con valor inherente*<sup>6</sup>(figura 3.1). Se puede dividir en dos clases: de manufactura y de servicios. En la primera clase, por lo general, los insumos y productos son tangibles y la transformación es física, en cambio, en los de la clase de servicios se pueden tener insumos y/o productos intangibles.

Un ejemplo de un sistema de producción de manufactura puede ser una empresa que fabrica pantalones de mezclilla. El insumo es la materia prima

---

<sup>6</sup> SIPPEN, Daniel, et-al, *Planeación y Control de la Producción*, McGraw-Hill, México, 1998, p. 7

como la mezclilla, hilo, cierre, botones. La transformación consiste en cortar la tela, unir las partes, coserle el cierre y los botones. Los pantalones de mezclilla son la salida.

Un ejemplo muy ilustrativo para un sistema de producción de servicios, muy utilizado en los textos, es el de una universidad, donde los alumnos de primer ingreso son el insumo, la transformación es la adquisición de conocimientos y finalmente el producto es un profesional.

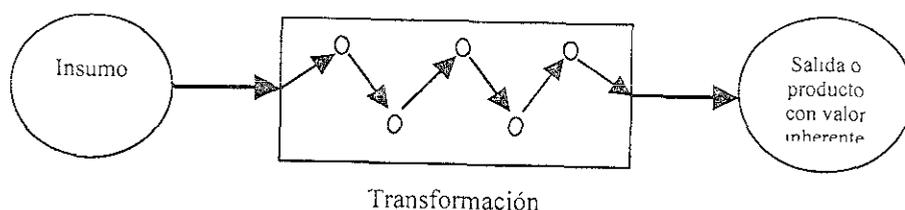


Figura 3.1  
Diagrama de un sistema de producción.

Teniendo muy en claro el concepto de un sistema de producción se puede hacer una analogía con el tránsito, donde el insumo son los vehículos, la transformación es recorrer una cierta distancia y el producto o salida es el acercarse a un destino final como puede ser a la casa, oficina o cualquier lugar a donde una persona se dirija. Con esta afirmación se justifica el uso de herramientas que se aplican para administrar los sistemas de producción.

Otra característica importante de un sistema de producción es que es un proceso de flujo con dos componentes importantes: materiales e información. En el flujo de materiales, por lo general, la trayectoria inicia en el inventario de materia prima, después se mueve a la planta donde tiene lugar la conversión del material, para llegar finalmente a ser parte del inventario de productos terminados siendo su destino final el cliente.

El flujo de información es más difícil de explicar, ya que no hace mucho fue cuando empezó a dársele importancia. A diferencia del flujo de materiales, el flujo de información puede tomar dos diferentes sentidos, dependiendo si se trata de un sistema jalar “pull” o un sistema empujar “push”.

### **III.2 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EMPUJAR**

La ley que gobierna en la producción tipo empujar (push) es: *sigue trabajando sin importar qué pase más adelante en la línea -haz según el plan-*.<sup>7</sup> El flujo de información se dirige en el mismo sentido que el flujo

---

<sup>7</sup> SIPPER, Daniel, et-al, *Planeación y Control de la Producción*, McGraw-Hill, México, 1998, p. 37.

físico. Este concepto funcionaba cuando se trataba de sistemas controlados por la producción en los que el mercado estaba garantizado, por lo cual se era insensible a los deseos del cliente y a lo que pasaba alrededor de todo el sistema. Se seguía produciendo aún en el caso de la descompostura de una máquina, es decir, el trabajo fluye de una operación a otra a través del sistema de producción sin importar lo que pase delante de él, lo que resultaba en congestionamientos en la planta y una obstrucción del flujo. Son sistemas basados en el programa, ya que el programa empuja la producción.

El precursor de los sistemas empujar fue una herramienta llamada Planeación de Requerimientos de Materiales (MRP por sus siglas en inglés), desarrollada en 1974 por Joseph Orlicky de IBM. Un crecimiento del MRP llevó al MRP II, el cual es un sistema de planeación, programación y control basado en computadora.

Proporciona a la administración una herramienta para planear y controlar sus actividades de manufactura y las operaciones de apoyo, obteniendo un nivel más alto de satisfacción del cliente y reduciendo, al mismo tiempo, los costos. En el presente trabajo, no se volverán a mencionar los sistemas empujar, puesto que no ayudan a cubrir los objetivos planteados.

### III.3 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN JALAR

En el sistema de producción tipo jalar (“pull”), el flujo de información y el flujo físico se dirigen en el mismo sentido, como lo muestra la figura 3.2. El objetivo es proporcionar una técnica de control sencilla que reduzca el tiempo de entrega y el trabajo en proceso. El sistema ya es controlado por el mercado, en el que la integración es el móvil primordial.

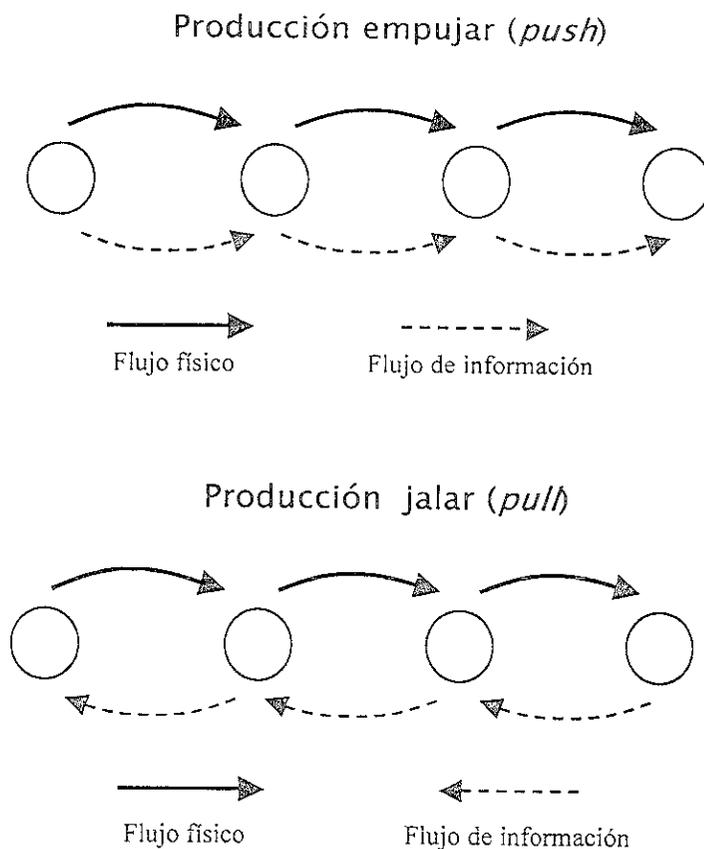


Figura 3.2

Esquemas que muestran los sentidos de los flujos físicos y de información en el sistema de producción empujar (*push*) y el sistema de producción jalar (*pull*).

Los sistemas jalar controlan el trabajo en proceso y miden la producción. La técnica jalar recibe el nombre de justo a tiempo (JIT, por sus siglas en ingles) o sistema JIT integrado.

El precursor de los sistemas jalar fue el sistema kanban, introducido a finales de los 1960's en la Toyota por Taichi Ohno.<sup>8</sup> Kanban, en japonés, significa tarjeta o registro visible, es un sistema de información manual para controlar la producción, el transporte de materiales y el inventario. También puede verse como una señal de comunicación de un cliente (como un proceso posterior) a un productor (como un proceso anterior).

Los dos tipos de kanban más comunes son:

- Kanban de producción (P-kanban), que dan la autorización a un proceso para elaborar un número fijo de productos.
- Kanban de transporte, que autorizan el transporte de un número fijo de productos hacia adelante.

En el problema de tránsito el flujo de material es el flujo de vehículos y el flujo de información va en el mismo sentido, es decir, se trata de un sistema

---

<sup>8</sup> <http://www.geocities.com/WallStreet/Brokerage/8040/jit.html>

de tipo empujar ya que se va atendiendo conforme llegan los automóviles. Además, cuando pasa un accidente o cualquier otra situación que provoque un cuello de botella, por lo general nadie se entera hasta que llega al lugar.

Parte del problema de los congestionamientos se debe a la falta de información sobre lo que está pasando más adelante, motivo por el cual se puede implantar un sistema jalar: cuando un punto se sature todos los puntos anteriores deben actuar en consecuencia.

Esto se puede dar por medio de señales electrónicas de desviación colocadas en puntos visibles de la vía o con una semaforización por tiempos adecuada, logrando con esto una integración de todo el sistema. Sería complicado y costoso un sistema que se activara en casos fortuitos, pero se puede desarrollar para las horas de máxima demanda con objeto de mejorar la vialidad en horas que por lo general tienen un exceso de tránsito.

### **III.4 PLANEACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN INTEGRADA**

El JIT (sistema jalar) y la teoría de restricciones (sistema de cuello de botella) son dos enfoques que junto con el sistema MRP (sistema empujar) forman lo que se conoce como planeación y control de la producción (PCP) integrada.

A diferencia de la PCP tradicional que se veía como una herramienta de producción este es un concepto global con una filosofía que controla la producción y un conjunto de herramientas para implantar esta filosofía.

La meta final de integración consiste en hacer una empresa más competitiva. El concepto de integración consiste en lograr una armonía, una total coordinación entre todos los departamentos y personas dentro de la empresa desde el director hasta cada uno de los trabajadores, es decir, se necesita la participación de cada una de las partes que forman el sistema.

Como se explicó anteriormente, cuando el tránsito de vehículos se comporta como un sistema empujar se originan problemas de congestionamiento, motivo por el cual el sistema MRP (sistema empujar) no se adecua en la búsqueda de soluciones para el problema del tránsito vehicular.

En el sistema todo está relacionado; lo que pasa en una intersección afecta a la siguiente y hace falta una integración adecuada de todos los elementos, desde los tiempos de semaforización, adecuaciones geométricas y flujo de información entre otros. El JIT y la teoría de restricciones son los enfoques de la PCP integrada que ayudan a la solución de problemas de tránsito de vehículos. El desarrollo y la aplicación de las metodologías del JIT y la teoría de restricciones se explican en el capítulo IV.

### **III.5 INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES**

La teoría de colas es una de las teorías y metodologías principales de la investigación de operaciones. *Aunque no existe una definición correcta para la investigación de operaciones, se puede decir que se aplica a problemas que conciernen a la conducción y coordinación de operaciones o actividades dentro de una organización.*<sup>9</sup> Es un conjunto de teorías que permiten encontrar las relaciones óptimas que mejor operen un sistema dado un objetivo específico.

---

<sup>9</sup> MARÍN, Pinillos Benito, *Investigación de operaciones I*, UNAM, 1994, p.3.

La investigación de operaciones es la aplicación de la metodología científica a través de modelos, primero para representar al problema real que se quiere resolver en un sistema y segundo, para resolverlo.

La investigación de operaciones siempre toma el punto de vista general de la organización e intenta llegar a soluciones óptimas, o sea la mejor solución para la organización.

Los inicios de la investigación de operaciones se remontan al año 1759, cuando el economista Quesnay empieza a utilizar modelos primitivos de programación matemática, pero no fue sino hasta la segunda guerra mundial (1939-1945) cuando empezó a tomar auge a causa de la necesidad de distribuir de manera eficiente materiales escasos a las distintas operaciones militares.

Debido al éxito logrado en el aspecto militar, la industria se fue interesando en este campo. Conforme la explosión industrial que siguió a la guerra continuó su curso, los problemas causados por la complejidad y la especialización crecientes en la organización volvieron al primer plano. Los investigadores descubrieron que la industria sufría de los mismos problemas básicos que los militares, pero en contextos diferentes.

La formación de líneas de espera en los problemas de tránsito de vehículos sugiere la aplicación de la investigación de operaciones para analizar las variables de este fenómeno. Se sabe que la teoría de colas en sí no resuelve directamente este problema, pero contribuye con información vital para la toma de decisiones prediciendo algunas características sobre la línea de espera.

En resumen, las tres metodologías a utilizar son la teoría de colas (líneas de espera), teoría de restricciones (TOC) y justo a tiempo (JIT). En las siguientes páginas se explicará en que consiste cada una de ellas, sus conceptos fundamentales, se comprobará si se pueden emplear y la forma de aplicarlas.

---



# CAPÍTULO IV DESARROLLO

## IV.1 TEORÍA DE COLAS

El objetivo de mejorar la vialidad en el tramo propuesto de la Av. Insurgentes consiste en disminuir las demoras generadas a los usuarios y las filas asociadas a dichas demoras. En los periodos de máxima demanda, el movimiento vehicular se torna deficiente provocando una disminución de la velocidad, lo que hace que el sistema tienda a saturarse hasta llegar a funcionar a niveles de congestionamiento, provocando las mencionadas demoras y filas en el sistema.

Las demoras y las filas son un fenómeno estudiado en la investigación de operaciones por la teoría de colas, la cual incluye el estudio matemático, mediante el uso de algoritmos y modelos, para analizar dicho fenómeno. La formación de la línea de espera es un fenómeno que ocurre siempre que la demanda actual de un servicio excede la capacidad actual de proporcionarlo.

La teoría de colas en sí no resuelve directamente este problema, pero contribuye con información vital para tomar las decisiones concernientes prediciendo algunas características sobre la línea de espera.

#### IV.1.1 ESTRUCTURA BÁSICA DE UN MODELO DE COLAS

Se genera una cola cuando los vehículos (clientes) llegan a una estación de servicio cualquiera, por ejemplo una intersección con semáforo, un enlace de entrada a una autopista, un carril especial de vuelta o un cuello de botella. La prestación del servicio para cada llegada toma cierto tiempo y puede ofrecerlo una o más estaciones. Los vehículos llegan al sistema con una tasa de llegadas  $\lambda$ , entran a la estación de servicio si está desocupada, o en caso contrario se forman en la cola a esperar ser atendidos. La estación de servicio atiende clientes a una tasa media de servicio  $\mu$  (figura 4.1).

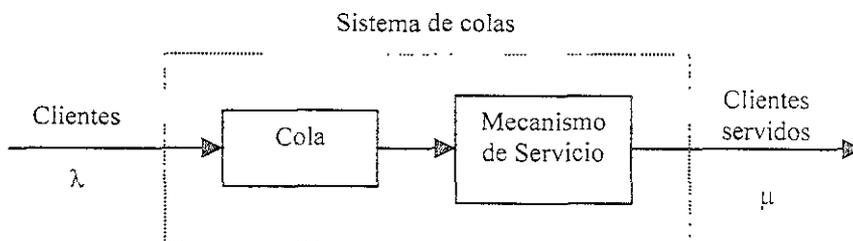


Figura 4.1  
Estructura básica de un modelo de colas

Los patrones que caracterizan a los sistemas de líneas de espera son:

- patrones de llegada
- patrones de servicio
- número de servidores
- capacidad del sistema para conservar clientes
- orden de atención a los clientes

La notación usada para el análisis de los sistemas de líneas de espera es:

$$1 / 2 / 3$$

donde en  $1$  se denota la distribución de tiempos entre llegadas, en  $2$  se denota la distribución de tiempos de servicio y en  $3$  se describe el número de servidores ( $s$  o  $k$ ).

En las distribuciones de tiempo se utiliza la simbología:

M = Distribución exponencial (markoviana)

D = Distribución degenerada (tiempos constantes)

$E_k$  = Distribución Erlang (con parámetro de forma  $k$ )

G = Distribución general (permite cualquier distribución arbitraria)

Las variables a analizar en un modelo de colas son:

$L_q$  = Número de clientes esperado en la línea

$L$  = Número de clientes esperado en el sistema

$W_q$  = Tiempo esperado en la línea

$W$  = Tiempo esperado en el sistema

$P_n$  = Probabilidad de que haya exactamente  $n$  clientes en el sistema

$\rho$  = tasa de llegadas  $\lambda$  entre tasa de servicio  $\mu$

#### **IV.1.2 ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LA TEORÍA DE COLAS**

Para cada distribución de tiempos de llegadas o de servicios existe un modelo diferente. Los modelos básicos son los que consideran distribuciones de tiempos exponenciales, siendo estos modelos del tipo M/M/s.

La suposición de tiempos entre llegadas o servicios exponenciales implica que estas ocurren aleatoriamente (un proceso de entradas Poisson), lo cual es una aproximación razonable en muchas situaciones pero no cuando las llegadas están programadas o reguladas con todo cuidado<sup>10</sup>, como es el caso de los vehículos que entran a un sistema de líneas de espera y cuya fuente de entrada y tasa de servicio está regulada mediante un semáforo con tiempos de verde y rojo constantes.

<sup>10</sup> Hillier, F. S – et-al., Introducción a la Investigación de operaciones , Quinta edición, Mc Graw Hill, p. 628 y 629.

El modelo que se propone como adecuado es el  $E_m/E_k/1$ , donde se considera que la distribución Erlang, tanto para los tiempos de llegadas como para los tiempos de servicios, es la que más se acerca a la realidad al estar entre el rango de variación cero (distribución degenerada) y variación muy grande (distribución exponencial).

Desafortunadamente, el análisis matemático de los modelos de colas con distribuciones no exponenciales es muy difícil<sup>11</sup> y para el caso particular de la distribución Erlang no se encontró una referencia que permitiera calcular los parámetros de forma  $m$  y  $k$  del modelo propuesto  $E_m/E_k/1$ .

De los modelos disponibles en la bibliografía consultada el que más se acerca al modelado del fenómeno de líneas de espera en un cuello de botella de tránsito es el modelo  $M/D/s$ , mismo que cuando  $s=1$  (un sólo servidor), resulta en un caso particular del modelo  $M/G/1$  teniendo que:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\lambda}{\mu} & L_q &= \frac{\rho^2}{2(1-\rho)} \\ L &= \rho + L_q & W_q &= \frac{L_q}{\lambda} \\ W &= W_q + \frac{1}{\mu} \end{aligned}$$

Cuadro 4.2  
Fórmulas para el modelo  $M/G/1$

<sup>11</sup> Hillier, F. S. – et-al.. Introducción a la Investigación de operaciones, Quinta edición, Mc Graw Hill, p. 628 y 629.

Realizando el cálculo de los valores en el cuello de botella en Dr. Gálvez con las formulas del cuadro 4.2 entre el lapso de las 18:45 y 20:45 horas, que incluye el tiempo en que se forma el cuello de botella y considerando como tasa de llegada  $\lambda$  y tasa de servicio  $\mu$  a los promedios de llegadas y servicios en ese lapso de tiempo, mostrados en la tabla 4.3, se tiene que:

Tabla 4.3  
Tasas de demanda y servicio en el cuello de botella en Dr. Gálvez

De A	Hora								
	18:45 19:00	19:00 19:15	19:15 19:30	19:30 19:45	19:45 20:00	20:00 20:15	20:15 20:30	20:30 20:45	20:30 20:45
Demanda	482	500	544	609	594	513	460	401	
Servicio	506	498	443	426	459	531	625	692	

Fuente: elaboración propia

$$\lambda = 512.875 \frac{\text{vehículos}}{15 \text{ minutos}}, \quad \mu = 522.5 \frac{\text{vehículos}}{15 \text{ minutos}}$$

Sustituyendo

$$L_q = 26.2 \text{ autos en la fila}$$

$$L = 27.1 \text{ autos en el sistema}$$

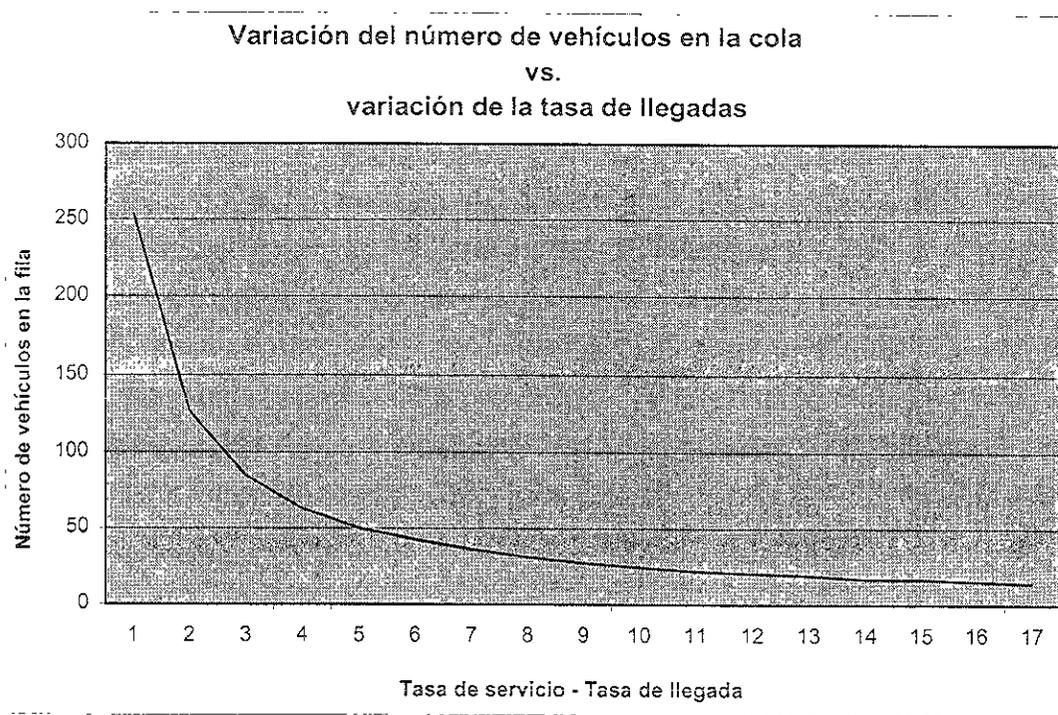
$$W_q = 0.76 \text{ min. en la fila}$$

$$W = 0.79 \text{ min. en el sistema}$$

Los resultados obtenidos están muy alejados de la realidad, ya que en la línea de espera que se forma antes del cuello de botella, cada vehículo está en promedio formado 6 minutos y la fila se extiende a más de 300

vehículos. Estos resultados se detallan en el análisis determinístico de la teoría de colas que se explica en páginas siguientes.

Para determinar el comportamiento del número de clientes esperando en la línea conforme varía la tasa de llegada y la de servicio, se realizó la siguiente gráfica:



Fuente: elaboración propia

Gráfica 4.4

Variación del número de vehículos en la cola vs. Variación de la tasa de llegadas

El eje de las abscisas muestra la diferencia entre la tasa de servicio menos la tasa de llegada, mientras que el eje de las ordenadas muestra el número de vehículos que estarían en la cola según el modelo M/G/1. Es decir, si la

tasa de servicio es de 510 vehículos en 15 min. y la tasa de llegada es de 509 vehículos en 15 min. (diferencia de 1), se tendrán 254 vehículos en la fila. Con dos vehículos de diferencia (entre la tasa de servicio y la tasa de llegada) se tendrán 126 vehículos en la fila.

El cuello de botella tiende a tener un número grande de vehículos en la fila (más de 300). De la gráfica 4.4 se observa que, por lo tanto, los valores de  $\mu$  y  $\lambda$  están en un rango donde al existir una pequeña diferencia entre ellos los valores de  $L_q$  varían mucho. Si se quisiera usar este modelo para describir el sistema de líneas de espera que se forma detrás del cuello de botella, un mínimo error en el cálculo de  $\mu$  y  $\lambda$  provocaría que los valores de  $L_q$ ,  $L$ ,  $W_q$  y  $W$  resultaran muy alejados de la realidad.

Esta gran "sensibilidad" a errores en el cálculo de  $\mu$  y  $\lambda$  hacen que este modelo sea poco práctico de aplicar. La gráfica 4.4 está muy lejos de pretender ser una demostración formal de esta afirmación; solamente se muestra para ejemplificar la sensibilidad que el cálculo de  $\mu$  y  $\lambda$  tiene en los resultados de  $L_q$ ,  $L$ ,  $W_q$  y  $W$  para el modelo M/G/1.

En resumen:

1. Los modelos básicos de la teoría de colas sólo son válidos para condiciones de estado estable, esto es que sólo son aplicables cuando los patrones de llegadas y servicios se sostienen por largos periodos. El

modelo que se propone para representar de manera adecuada el problema de línea de espera en un cuello de botella de tránsito es aquel que no considere tiempos exponenciales de llegadas ni de servicio.

2. El modelo que se propone para el análisis de una línea de espera formada por un cuello de botella es  $E_m/E_k/1$ , pero por la complejidad de su análisis se usó un modelo  $M/D/1$ .
3. El modelo usado ( $M/D/1$ ) resultó ser muy sensible, ya que con un pequeño error en el cálculo de  $\mu$  y  $\lambda$  se tiene una gran variación en los resultados de  $L_q$ ,  $L$ ,  $W_q$  y  $W$ , por lo cual no se recomienda aplicar este modelo.
4. El análisis probabilístico de las líneas de espera no se puede aplicar a aquellas situaciones de máxima demanda en las cuales los flujos de llegadas  $\lambda$  exceden la capacidad en estado estable de servicio  $\mu$ .
5. Como conclusión de los puntos 1 a 4, se considera que el análisis probabilístico de líneas de espera no es aplicable para cuellos de botella en el tránsito.

### IV.1.3 ANÁLISIS DETERMINÍSTICO DE LA TEORÍA DE COLAS

El análisis determinístico consiste en el cálculo preciso del valor de una variable en función de ciertos valores específicos que toman otras variables.<sup>12</sup> Esto es, solamente ocurrirá un valor de la función objetivo para un conjunto dado de valores de las variables de entrada.

Este análisis determinístico se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. Se determina un rango de tiempo para el análisis. Debe incluir una unidad de tiempo anterior al congestionamiento y una unidad de tiempo después de que ya se haya disipado el congestionamiento.

*La hora de máxima demanda es de 19:15 a 20:15 horas, se selecciona un rango de media hora antes y media hora después, ya que por observación, a las 20:45 horas ya se disipó el congestionamiento, quedando el intervalo de análisis de 18:45 a 20:45 horas.*

---

<sup>12</sup> CAL Y MAYOR, Rafael, et -al, *Ingeniería de tránsito*, edit. Alfaomega, México, 1994, 7ª. Edición

2. Se obtienen las tasas de demanda y servicio para cada unidad de tiempo seleccionada.

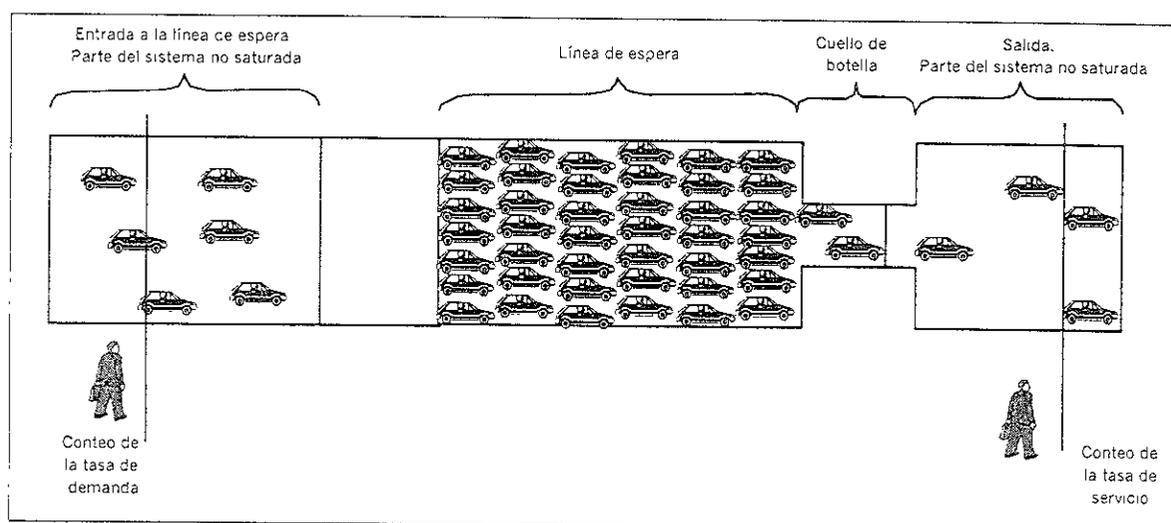
*Se tomaron medidas de demanda y servicio cada 15 minutos, obteniendo los resultados de la tabla 4.3. La toma de datos se esquematiza en la Figura 4.5.*

**Tabla 4.3**  
Tasas de demanda y servicio en el cuello de botella en Dr. Gálvez

	De A	Hora							
		18:45 19:00	19:00 19:15	19:15 19:30	19:30 19:45	19:45 20:00	20:00 20:15	20:15 20:30	20:30 20:45
<b>Demanda</b>		482	500	544	609	594	513	460	401
<b>Servicio</b>		506	498	443	426	459	531	625	692

Fuente: elaboración propia

**Figura 4.5**  
Esquema para representar la toma de datos en un cuello de botella



Fuente: elaboración propia

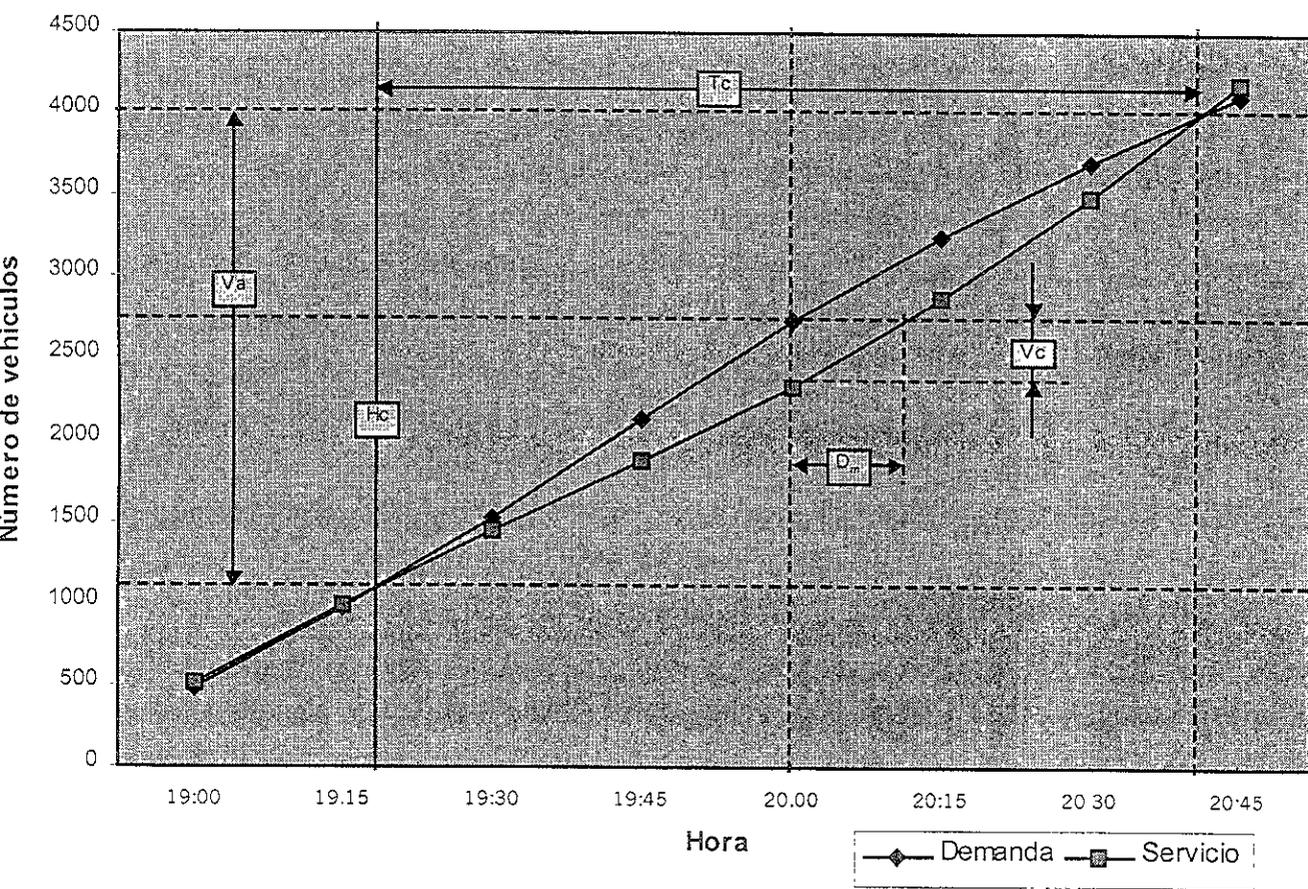
3. Se realiza una gráfica (gráfica 4.7) de las tasas de demanda y de servicio acumuladas. Los datos de la gráfica se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4.6  
Tasas de demanda y servicio acumuladas en el cuello de botella en Dr. Gálvez

De A	Hora							
	18:45 19:00	19:00 19:15	19:15 19:30	19:30 19:45	19:45 20:00	20:00 20:15	20:15 20:30	20:30 20:45
Demanda acumulada	482	982	1526	2135	2729	3242	3702	4103
Servicio acumulado	506	1004	1447	1873	2332	2863	3488	4180

Fuente: elaboración propia

TASA DE DEMANDA Y SERVICIO ACUMULADAS



Gráfica 4.7  
Tasas de demanda y de servicio acumuladas

4. Con base en la gráfica se calculan los siguientes datos:

a) Hora a la cual empieza el congestionamiento ( $H_c$ ).

Cuando las llegadas exceden la capacidad.

19:18 horas.

b) Duración del congestionamiento ( $T_c$ ).

Tiempo en que la demanda supera la capacidad de servicio.

*El momento en que la capacidad de servicio es igual a la demanda se da cuando se cruzan ambas curvas. El primer punto de intersección se da en las 19:18 h y el segundo en las 20:40 h. La duración del congestionamiento es de 1 hora 22 minutos.*

c) Número máximo de vehículos en la cola ( $V_c$ )

Ocurre cuando se presenta la máxima separación de ordenadas entre ambas curvas para el mismo tiempo y se calcula restando las ordenadas en ese tiempo.

$$2,729 - 2,332 = \underline{397}$$

d) Demora máxima que experimenta un vehículo ( $D_m$ )

Ocurre cuando se presenta la máxima separación de abscisas entre ambas curvas para el mismo número acumulado de vehículos y se calcula restando las abscisas.

$$20:12 h - 20:00 h = \underline{12 minutos.}$$

e) Número de vehículos afectados por el cuello de botella ( $V_a$ )

Es el número de vehículos que se ven afectados en el momento en que la tasa de demanda supera la tasa de servicio. En la gráfica se determina restando las ordenadas de los puntos donde cruzan las curvas.

$$3,996 - 1,100 = \underline{2,896 \text{ veh\u00edculos afectados}}$$

No se presentan los algoritmos utilizados para determinar los valores de abscisas y ordenadas en los puntos de las intersecciones, ya que estos algoritmos var\u00edan seg\u00fan los datos de cada caso particular. La manera como se calcularon los puntos en que se cruzan las rectas fue mediante sus ecuaciones.

Este an\u00e1lisis determin\u00edstico obtiene datos muy coherentes seg\u00fan la observaci\u00f3n directa de la l\u00ednea de espera formada antes del cuello de botella, por lo cual se considera un m\u00e9todo recomendable para determinar las caracter\u00edsticas de una l\u00ednea de espera formada a causa de cuellos de botella en tr\u00e1nsito.

## IV.2 JUSTO A TIEMPO (JIT)

Como se explicó en el capítulo III, el verdadero espíritu de los sistemas jalar es la administración de la interdependencia. En la interdependencia secuencial la salida de cada operación depende de la entrada de una (o más) operaciones anteriores. En la interdependencia recíproca cada operación afecta y es afectada por una o más operaciones, lo que requiere un ajuste mutuo para su coordinación.

La interdependencia recíproca es el principio básico del sistema jalar. El material fluye hacia delante y la información hacia atrás. Un sistema jalar transforma un sistema interdependiente secuencial a un sistema interdependiente recíproco. La aplicación del principio de jalar se conoce como el sistema JIT<sup>13</sup>.

El método productivo justo a tiempo (*Just In Time*, JIT) surge en las empresas japonesas y lo hace principalmente como una posible solución a uno de los mayores problemas subyacentes en la nación nipona: el ahorro de espacio.

---

<sup>13</sup> SIPPER, Daniel, et-al, *Planeación y Control de la Producción*, McGraw-Hill, México, 1998, p. 565.

En una nación con poco terreno como Japón, el bien máspreciado es sin lugar a duda el espacio físico. Por ello, uno de los pilares de la nueva filosofía fue precisamente el ahorro de espacio, la eliminación de desperdicios y, en conclusión, la eliminación de problemas que supone la existencia del inventario.

Se puede decir que el JIT fue una respuesta al hecho de la feroz competencia que surgió por el nacimiento de un gran número de empresas, relacionadas con los mismos sectores tecnológicos. La lucha por la supremacía mundial se enfocó hacia la innovación. Con la aparición casi simultánea de productos similares fabricados por diferentes empresas se reducía la cuota de mercado y, por lo tanto, los beneficios. Las empresas debían ser superiores a sus competidoras y lo debían ser en aquellos aspectos que a nadie se le hubiera ocurrido. Las empresas japonesas fueron las primeras en enfocar sus productos e innovaciones en esta dirección. Para ello debían de ser las mejores en innovación de nuevos productos, pero además debían ser las más rápidas para evitar que la competencia redujera su margen de beneficios.

El avance tecnológico impidió que aumentara la diferencia de tiempo desde que se lanzaba el nuevo producto hasta que los competidores lo “reproducían”. Por lo tanto, se debía buscar un nuevo método para seguir

innovando pero aumentando el margen de beneficios. Y precisamente ésta es la filosofía de la innovación: el JIT. Las primeras empresas que implantaron este método productivo, Toyota y Kawasaki, se convirtieron rápidamente en líderes mundiales en su sector.

En occidente, los enfoques tradicionales para el control de los inventarios se han basado en la incertidumbre, la cual está directamente relacionada con el margen de tiempo de reabastecimiento (es decir, con el tiempo que lleva reabastecer las existencias mediante compras o manufacturas) o bien con la demanda esperada. Ante la necesidad de tener garantías de seguridad de cara a una fluctuación inesperada de la demanda, en la que unos valores pico podrían llegar a agotar las existencias sin haber finalizado todos los trabajos de la producción, las empresas occidentales han elegido en su gran mayoría como solución a este posible problema el acaparar lotes de materias primas configurando así lo que se denomina "colchón de capacidad", el cuál no es más que una parte prácticamente fija dentro de los inventarios destinada a asegurar las existencias en tiempos difíciles. Esta forma habitual de proceder en las empresas occidentales da lugar a la aparición del término desperdicios; por otro lado el JIT busca eliminar los inventarios, así como los colchones de capacidad.

La filosofía del JIT se basa principalmente en dos expresiones que resumen sus objetivos: *"el hábito de ir mejorando"* y la *"eliminación de desperdicios"*, el punto de vista de justo a tiempo es que el inventario no

---

agrega valor, sino que hace incurrir en costos, de acuerdo con esto, mantener un inventario es análogo a no recibir ningún interés por un depósito en el banco y, además, pagar por guardarlo ahí. Las ineficiencias que ocasiona el inventario incluyen: grandes y costosas instalaciones, espacios ociosos, desperdicio, tiempos de manufactura largos y muy variables, largas esperas en los centros de trabajo, capacidad inadecuada, entre otros.

La eliminación del inventario no significa la eliminación de los pedidos de materias primas; significa que dichos pedidos se realizarán justo a tiempo. De esta forma, los únicos materiales que circularán por la línea de producción serán las piezas de los productos. La agilización de la cadena de montaje consigue que este flujo de materiales sea muy rápido, es decir, que las piezas "no descansan", van continuamente en su línea de producción de un puesto a otro. De esta manera, los únicos materiales dignos de ser controlados en la empresa serán las materias primas y los productos terminados. La simplificación de las tareas de producción simplifica los instrumentos de gobierno y control. Y por lo tanto, el control ejercido ahora sobre los materiales y sobre los productos será mucho mayor, ya que también es mayor la facilidad para seguir a dichos elementos dentro de la línea productiva.

El JIT busca hacer mejor las cosas, un perfeccionamiento continuo. Tener el mejor material, en el momento preciso, en el lugar adecuado y en la cantidad exacta.

El interés de aplicar JIT (*Just In Time*), o justo a tiempo, no está en sus técnicas o metodologías, sino en su filosofía, cuyos principios básicos incluyen<sup>14</sup>:

- A. *Deberá eliminarse cualquier desperdicio, es decir, aquello que no agrega valor al producto o servicio. Valor se considera todo aquello que aumenta la utilidad del producto o del servicio al cliente, o reduce el costo para el cliente.*

El desperdicio es el tiempo que pierden los automovilistas cuando, estando dentro del sistema, no se están moviendo. El mayor desperdicio se da cuando se almacenan los automóviles antes del cuello de botella. Deberá eliminarse el cuello de botella.

- B. *JIT es un viaje interminable, pero con etapas y acontecimientos importantes que valen la pena.*

La búsqueda de mejores alternativas para solucionar los problemas viales debe ser permanente. Este trabajo propondrá una solución

---

<sup>14</sup> FOGARTY, W Donald, et-al, *Administración de la Producción e Inventarios*, Cía. Editorial Continental, 1995, p. p. 649-650.

que represente un acontecimiento importante que valga la pena, pero que no representa una solución permanente.

- C. *El inventario es un desperdicio. Oculta problemas que deberían resolverse al lograr disimularlos.* El desperdicio se puede eliminar gradualmente, al retirar pequeñas cantidades de inventario del sistema, corregir los problemas resultantes y entonces eliminar más inventario.

El inventario en el sistema es inventario en proceso. Estos son automóviles que se encuentran almacenados antes de un cuello de botella y en un semáforo en rojo. No interesa disminuir el número de automóviles detenidos por un semáforo en rojo, ya que el principal desperdicio en inventario está antes del cuello de botella.

- D. *Las definiciones que tienen los clientes con respecto a calidad, así como sus criterios para evaluar el producto, deben guiar el diseño del producto y el sistema de fabricación.* Esto implica una creciente tendencia hacia productos fabricados de acuerdo con las indicaciones del cliente.

Los clientes del sistema son peatones y automovilistas. Lo que esperan obtener al usar el sistema es una ruta de transporte rápida y segura.

- E. *La flexibilidad en la producción, que incluye respuesta rápida a las solicitudes de entregas a cambios en el diseño y cambios en las cantidades, es indispensable para mantener la calidad y el bajo costo con una línea de productos cada vez más diferenciada.*
- F. *Entre la organización, sus empleados, sus proveedores y sus clientes debe existir respeto y apoyo mutuo basado en la apertura y la confianza.*
- G. *Se requiere esfuerzo de equipo para alcanzar la capacidad de fabricación con clase mundial.* En esta tarea, deben participar la administración, el personal y los trabajadores.
- H. Con frecuencia, el empleado que realiza una actividad es la mejor fuente de sugerencias en cuanto al perfeccionamiento en la operación. Es importante aprovechar la capacidad mental de los trabajadores y no sólo su habilidad manual.

Lo primero y más importante es descubrir “qué funciona” y “por qué trabaja”, analizar el proceso y cada una de las operaciones para encontrar oportunidades de mejoras drásticas.

El método JIT busca la eliminación de las colas de existencias, las materias primas se entregan 'justo a tiempo', de forma que el ciclo de producción se reduce generalmente en un 90 % o más, ya que los productos semiterminados no tendrán que esperar a que lleguen las piezas que les faltan del almacén. El JIT ataca directamente al tiempo de espera del producto, eliminando los tiempos de espera. Se deben enfatizar aspectos como la disminución de los tiempos de montaje y la fabricación de productos en lotes más reducidos o la producción según la demanda.

El método JIT comprende lo siguiente:

- I. Reducción de los tiempos de preparación para lograr menores lotes de producción.
- II. Mayor uso de procesos de flujo secuenciales tales como líneas dedicadas al ensamble.
- III. Empleo incrementado de trabajadores multifuncionales.
- IV. Aumento en la flexibilidad del equipo y de la capacidad.
- V. Incremento del mantenimiento preventivo.
- VI. Mayor estabilidad y consistencia en el programa.
- VII. Relaciones de más largo plazo con los proveedores.
- VIII. Mejor apoyo técnico de los proveedores.

- IX. Programas que involucren a los trabajadores.
- X. Control estadístico del proceso.
- XI. La prerrogativa de parar la producción.
- XII. Análisis de causa y efecto.

Una de las actitudes más desastrosas y dañinas para una empresa es sin lugar a duda intentar implantar obligatoriamente un sistema de producción a un sistema de “*software*”. Con casi toda seguridad, el “*software* obligado” restará efectividad a las operaciones. La principal ventaja de las computadoras en un sistema productivo es la capacidad de procesamiento y almacenamiento de grandes cantidades de información, así como su capacidad en la presentación de datos, pero se debe de buscar un “*software*” adecuado a las necesidades y no tener que adaptar el proceso al “*software*”.

Antes de instalar en un sistema productivo un sistema de “*software*”, la empresa debe ante todo comprender sus carencias y entender bien el sistema en el que va apoyarse, para que pueda diseñarse el sistema de tal modo que sea éste el que se adapte a la necesidades, y no a la inversa, indicando claramente cuáles serán sus características y cómo debe funcionar. También se tiene que tomar en cuenta que a veces la modernidad y los avances tecnológicos no tienen necesariamente que ser implantados para mejorar un sistema.

## **IV.2.1 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN FUNDAMENTADAS EN UN SISTEMA JIT**

a) Deberá eliminarse cualquier desperdicio, aquello que no agrega valor al producto o servicio. El inventario es un desperdicio y en el sistema se ve reflejado en su punto crítico como automóviles que hacen fila para pasar por el cuello de botella.

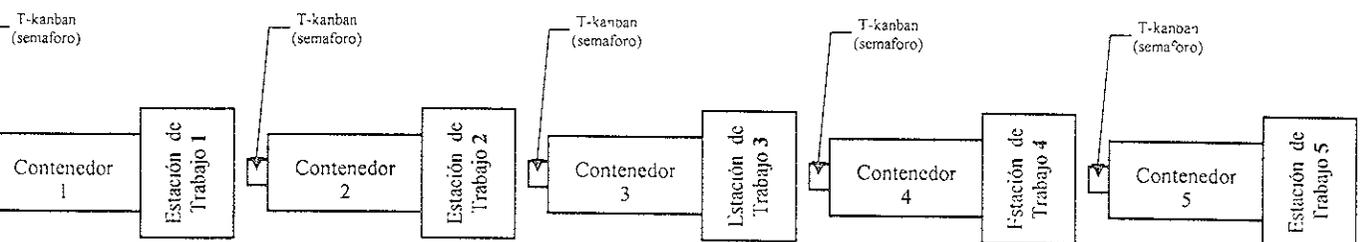
Eliminando el cuello de botella se elimina el inventario o por lo menos se reducirá. La solución propuesta para el cuello de botella se desarrolla en la teoría de restricciones, pero obedece a la necesidad de solución que el JIT plantea.

b) Los productos son vehículos que buscan ser atendidos por una estación de trabajo (el crucero). Para hacer que los productos lleguen a la estación de trabajo en el momento preciso y en la cantidad adecuada se sugiere una implantación análoga con un sistema Kanban de una sola tarjeta (T-kanban).

Las tarjetas que autorizan el transporte de material de una estación a otra son los semáforos, mientras que los contenedores que almacenan material de una estación a otra son los carriles de la calle entre crucero y crucero.

El objetivo del sistema kanban es que exista información para controlar el transporte de materiales y el inventario. De esta manera cuando exista una saturación en una estación de trabajo, las estaciones anteriores no mandarían más material hasta que la estación con problemas se desahogue, ayudando con esto a que otras estaciones de trabajo tampoco se saturen.

Por ejemplo; si se tienen vehículos que viniendo de la estación de trabajo 5 van a usar la estación de trabajo 3 (fig. 4.8) y esta estación se encuentra saturada, la estación de trabajo 4 no debe autorizar el pase de material proveniente del contenedor 5, por el contrario, debe almacenarlo hasta que su contenedor se llene. Esto evitaría que la estación de trabajo 4 se sature y que no pueda atender otro tipo de trabajos (como vehículos que desean usar solamente la estación de trabajo 4).



Fuente: elaboración propia

Figura 4.8  
Estaciones de trabajo (cruceos) cuyo flujo de material (vehículos) está controlado por un sistema kanban

Los sistemas kanban están definidos como sistemas de información manual, sin embargo, lo que se necesita para la aplicación de este sistema en la semaforización es que sean de aplicación automática. Deben de considerarse 3 aspectos:

- Los semáforos deben estar sincronizados de tal manera que una estación de servicio no deje pasar material (vehículos) hasta que la siguiente estación de servicio tenga la capacidad para atenderlos.
- Los semáforos deben ser dinámicos. Deben modificar sus tiempos de servicio según la demanda que tenga cada cruce para diferentes combinaciones de movimientos (ya sean de vehículos como de peatones) en cada hora del día.
- Se deben considerar los trabajos urgentes, como son dar prioridad en el servicio de los cruces para ambulancias, patrullas y carros de bomberos.

El desarrollo de estos puntos en propuestas concretas fundamentadas con un análisis de resultados resulta muy laborioso y no se considera en la discusión de este trabajo. El motivo es que el presente trabajo se enfocará al análisis directo del cuello de botella, mismo que se detalla en el desarrollo de la teoría de restricciones, ya que se considera la solución del cuello de botella como la más favorable en la solución del problema vial correspondiente al sistema.

### IV.3 TEORÍA DE RESTRICCIONES (TOC)

La teoría de las restricciones (*Theory of Constraints*, TOC) fue desarrollada por el físico israelí Eliyahu Moshe Goldratt quien en 1979 introdujo en Estados Unidos su teoría bajo la marca registrada de OPT en Estados Unidos y fundó *Creative Output, Inc.* (COI).<sup>15</sup>

La teoría de restricciones es un conjunto de procesos de pensamiento que utiliza la lógica de la causa y efecto para entender lo que sucede y así encontrar maneras de mejorar. Está basada en el simple hecho de que los procesos multitarea, de cualquier ámbito, sólo se mueven a la velocidad del paso más lento. La manera de acelerar el proceso es utilizar un catalizador en el paso más lento y lograr que trabaje hasta el límite de su capacidad para acelerar el proceso completo. En la descripción de esta teoría los factores limitantes se denominan restricciones o "cuellos de botella". Restricciones puede ser un individuo, un equipo, una política local, una máquina, etc.

En una planta de manufactura, el recurso con mayor carga en relación con su capacidad restringe el rendimiento de los otros.

---

<sup>15</sup> SIPPER, Daniel, et-al, *Planeación y Control de la Producción*, Mc Graw-Hill, 1998.

La premisa de TOC es que los cuellos de botella en la producción son la base para la programación y la planeación de la capacidad. Los recursos se clasifican como aquellos que son cuello de botella y aquellos que no lo son. Los recursos cuello de botella se programan a su máxima utilización y el resto se programa para servir al cuello de botella, lo cual significa que en algunos casos los recursos que no son cuellos de botella pueden estar ociosos. Esto no significa que estos recursos se están desperdiciando, ya que si se ponen al 100 % de su capacidad, de acuerdo con el principio de eficiencia, el inventario crecería hasta provocar retrasos en las entregas debido a las colas generadas, provocando un consiguiente incremento en costos.

La teoría de restricciones parte de que cualquier sistema tiene al menos una restricción. Si no fuera así podría generar una cantidad infinita de productos. Pensando de esta forma, la teoría de restricciones se explica fácilmente a través del uso de la analogía de la cadena: una cadena es tan fuerte como lo es su eslabón más débil.

Si se observa a una organización como una cadena en donde cada departamento es un eslabón de la misma, ¿qué restricciones tiene la organización para lograr su meta?. Solamente concentrándose en el eslabón más débil, en la restricción, se puede lograr un mejoramiento sustancial. En

otras palabras, si la restricción determina la velocidad de la habilidad de la organización para alcanzar su meta, tiene sentido que el concentrarse en la restricción va a permitir alcanzarla más rápidamente. En TOC, el superar la restricción actual tiene la expectativa de presenciar mejoras significativas en el proceso básico que lleva al logro de la meta de la organización. Si la siguiente restricción es una amenaza inmediata y significativa para el bienestar de una organización, debe ser enfrentada rápidamente para sostener el crecimiento de la organización.

La clave de TOC es que la operación de cualquier sistema complejo consiste en realidad en una gran cadena de recursos interdependientes (máquinas, centros de trabajo, instalaciones) pero sólo unos pocos de ellos, los cuellos botella (llamados restricciones), condicionan la salida de toda la producción. Reconocer esta interdependencia y el papel clave de los cuellos de botella es el primer paso que las compañías que adaptan TOC tienen que dar para crear soluciones simples y comprensibles para sus complejos problemas.

En el lenguaje de TOC, los cuellos de botella (restricciones) que determinan la salida de la producción son llamados *drums* (tambores), ya que ellos determinan la capacidad de producción (como el ritmo de un tambor en un desfile). De esta analogía proviene el método llamado *drum-*

*buffer-rope* (tambor - amortiguador - cuerda) que es la forma de aplicación de la teoría de restricciones a las empresas industriales.

Las reglas de TOC, formuladas para lograr la utilización máxima del cuello de botella, son<sup>16</sup>:

1. Se balancea el flujo, no la capacidad.
2. Las restricciones determinan la utilización de lo que no es un cuello de botella.
3. Utilización y activación de un recurso no son sinónimos.
4. Una hora perdida en un cuello de botella es una hora perdida en todo el sistema.
5. Una hora ahorrada en donde no hay cuello de botella es un espejismo.
6. Los cuellos de botella gobiernan la producción y el inventario en el sistema.
7. El lote transferido puede, y muchas veces debe, no ser igual al lote de proceso.
8. El lote de proceso debe ser variable, no fijo.
9. Deben establecerse programas observando todas las restricciones. Los tiempos de entrega son el resultado de un programa y no pueden predeterminarse.

<sup>16</sup> SIPPER, Dantel, et-al, *Planeación y Control de la Producción*, McGraw-Hill, México, 1998, p 592.

Finalmente, una fábrica consigue el flujo óptimo cuando el trabajo está programado correctamente para obtener el máximo rendimiento sin interrupciones en los cuellos de botella y cuando la salida de material está controlada para mantener ese rendimiento sin crear colas innecesarias de trabajo en los recursos menos restringidos.

El *throughput* (los productos producidos y enviados) estará maximizado; el trabajo en proceso (WIP, *work in process*) y el inventario de productos terminados será el mínimo; y el nivel de gastos de operación para mantener todo funcionando será el más bajo.

Por otro lado, las técnicas convencionales de administración de lotes de tamaño fijo, optimización de recursos no-restrictivos, reprogramación constante, etc. incrementan las fluctuaciones en todos los eslabones de la cadena de abastecimiento, creando cuellos de botella en el proceso.

Tener grandes inventarios de productos terminados es una manera extremadamente costosa de garantizar la respuesta requerida si la demanda del mercado no puede predecirse con exactitud o si es muy alto el riesgo de que los productos se vuelvan obsoletos debido a cambios de diseño constantes y la introducción de nuevos productos. Mover el material más rápidamente a través de la planta es la única alternativa sensata, especialmente en plantas donde el tiempo en colas de trabajo ocupa más del 80%.

Según resultados del capítulo II, el principal problema vial en el sistema se da en el sentido Insurgentes norte a sur, en su cruce con la calle Doctor Gálvez. En este punto los vehículos que circulan sobre Insurgentes tienen un exceso en volumen del 22% respecto del volumen de vehículos que pueden circular. Esto claramente es un cuello de botella y según la teoría de restricciones, la capacidad del sistema está limitada por la capacidad del cuello de botella.

#### **IV.3.1 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN FUNDAMENTADAS EN UN SISTEMA TOC**

Para encontrar la solución al problema del cuello de botella en el sistema se usaron los cinco pasos del TOC<sup>17</sup> desarrollados por Goldratt, los cuales son:

1. Identificar las restricciones del sistema, ¿qué o cuáles son los cuellos de botella?

Esta pregunta se contesta con el desarrollo del capítulo II. El punto más conflictivo es el cruce número 3 (Dr. Gálvez) en sentido norte a sur entre las 19:15 y 20:15 horas, donde la demanda rebasa en un 22% la capacidad.

---

<sup>17</sup> SIPPER, Daniel, et-al, *Planeación y Control de la Producción*, McGraw-Hill, México, 1998, p. 595.

## 2. Decidir como explotar la máxima restricción del sistema.

Observaciones hechas en el cruce donde se forma el cuello de botella resumen las siguientes razones de conflicto:

- a. El cuello de botella se da en un paradero de microbuses.
- b. Se produce el cuello de botella a la hora de máxima demanda de servicio del paradero de microbuses.
- c. Se disminuye el espacio físico para tránsito de vehículos debido a que los microbuses ocupan el carril de baja velocidad de la Av. Insurgentes para abordar y descender pasajeros. Con esto, sólo se dejan dos carriles y en ocasiones un sólo carril para el paso de los vehículos sobre Av. Insurgentes (Anexo 2).
- d. Los comerciantes ambulantes que ocupan espacios del paradero estorban la circulación de peatones y de microbuses.

Modificar la ubicación del paradero de microbuses no es viable ya que no se obtendría una solución parcial de bajo costo, la cual consiste en el aprovechamiento máximo de las condiciones existentes con el mínimo de obra material y el máximo en cuanto a regulación funcional del tránsito.

La demanda de servicio en el paradero de microbuses tampoco se puede modificar ya que el sistema se debe adecuar a la demanda, no la demanda al sistema.

La reubicación de los comerciantes ambulantes que ocupan banquetas del paradero es un problema social cuya solución se torna muy compleja y que no compete a los objetivos de este trabajo. Ya se han desarrollado otros proyectos para la mejora vial que se ven entorpecidos o cancelados por la fuerza social y/o política que ejercen grupos de vendedores ambulantes<sup>18</sup>.

Si se desea una solución aplicable que dé resultados a corto plazo, sin que represente una amenaza para grupos sociales y que esté dentro del marco de la ley, esta debe cumplir con:

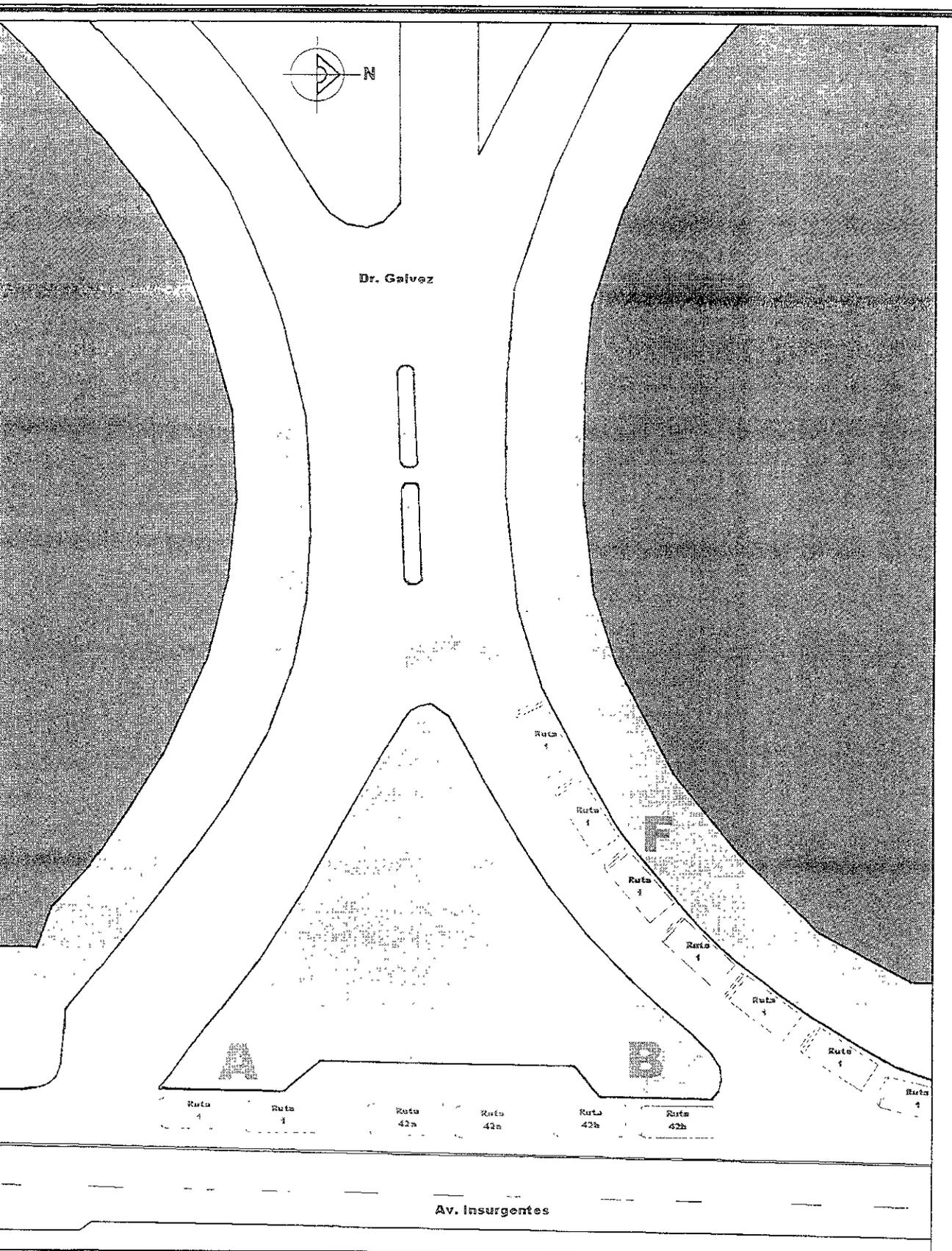
- Aprovechar el espacio físico existente buscando un reordenamiento geométrico que sea capaz de almacenar la demanda de microbuses que necesitan tener ascenso y descenso de pasajeros.
- No estorbar la circulación de los 3 carriles de Av. Insurgentes.
- No afectar los intereses de los comerciantes ambulantes.
- No dañar áreas verdes.
- No estorbar la entrada a estacionamientos de vehículos en comercios y a particulares.
- Garantizar espacios seguros de circulación para peatones.
- Cumplir con el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (Anexo 3).

---

<sup>18</sup> Información proporcionada verbalmente por el Ing. Jesús Antonio Esteva Medina. Dirección de Obras de Infraestructura. Gobierno del Distrito Federal. Octubre del 2000

El mapa actual del paradero en Dr. Gálvez se muestra en la figura 4.9. Resultados de investigación de campo en el cuello de botella resumen los siguientes problemas:

- a. Los microbuses de las rutas 1, 42a y 42b bloquean el tercer carril de Av. Insurgentes ya que se estacionan en este para ascenso de pasajeros. La cuchilla existente en esa banqueta (entre las zonas A y B de la figura 4.9) no se utiliza ya que los microbuses estacionados abarcan todo el extremo de la banqueta y prefieren estacionarse en línea recta para que sea más sencillo salir de la fila.
- b. Otros microbuses, taxis y camiones que no hacen “base” en este paradero realizan su descenso de pasajeros en el segundo carril de Av. Insurgentes, dejando con esto un sólo carril para la circulación de vehículos.
- c. Los microbuses de la ruta 1 se estacionan en la zona F marcada en la figura 4.9, teniendo como máximo 10 vehículos estacionados. Estos microbuses rebasan el espacio de banqueta sobre la calle Dr. Gálvez continuando la fila de microbuses estacionados en el tercer carril de Av. Insurgentes. Esto no sólo obstruye este carril, además obstruye por completo zonas de estacionamiento de dos comercios ubicados en esa zona.

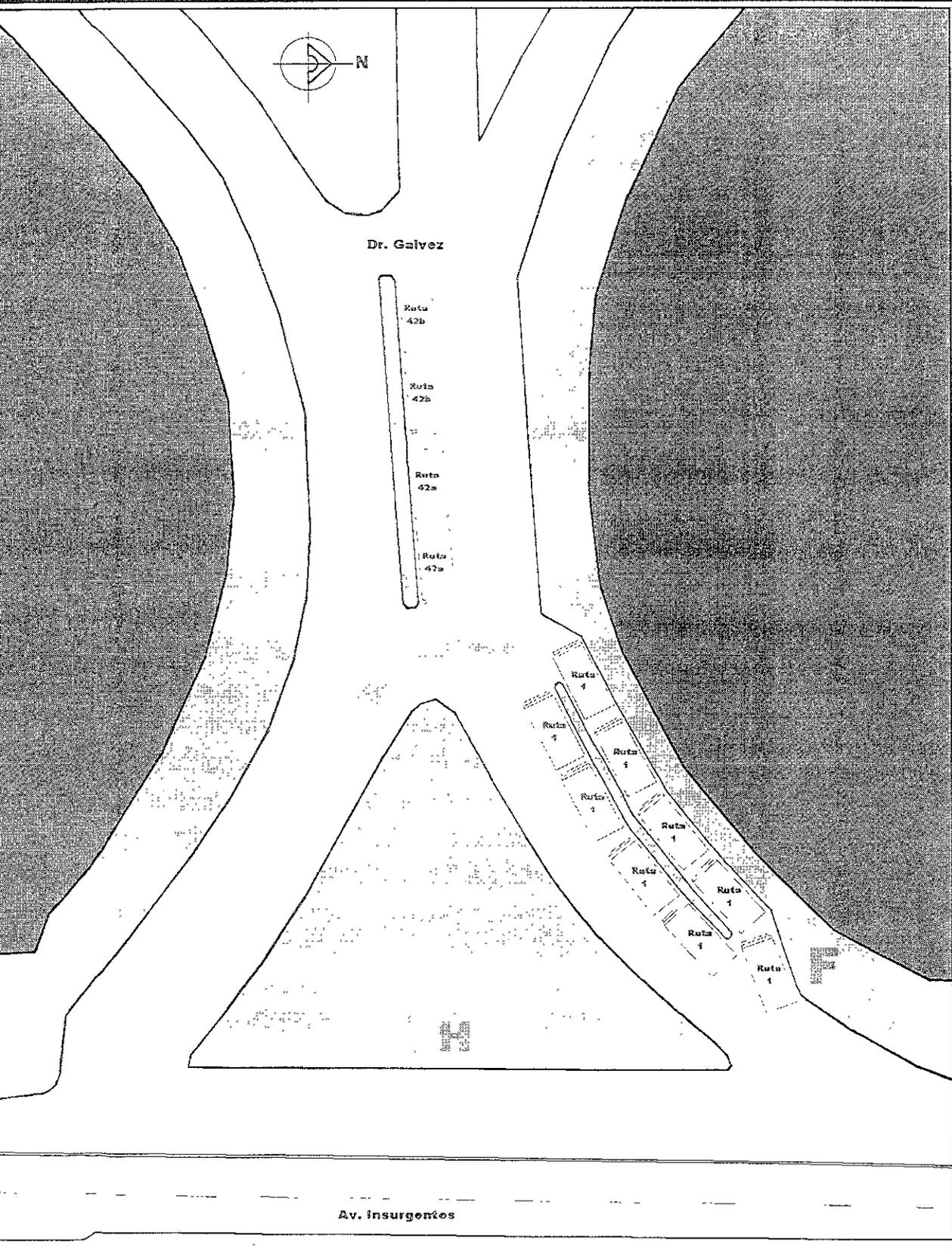


fuente: elaboracion propia Agosto 2001

**Figura 4.9**  
Mapa actual del paradero en Dr. Gálvez  
Escala 1 - 455

Considerando los puntos mencionados para que la solución propuesta sea aplicable y que dé resultados a corto plazo, se proponen los cambios geométricos en el paradero mostrados en la figura 4.10, los cuales consisten en:

- a. Eliminar como zona de abordaje de pasaje la usada por las rutas 1, 42a y 42b sobre Av. Insurgentes.
- b. La “base” de las rutas 42a y 42b se reubica como se muestra en la figura 4.10 y se adecuan los espacios de las banquetas paralelas para que los carriles de circulación queden con la misma longitud. La “base” de la ruta 1 se realizará en la zona F, misma zona que ocupan estos microbuses para estacionarse.
- c. Usar el espacio de la zona H de la figura 4.10 sólo para descenso de pasaje de aquellos vehículos de transporte público que circulen sobre Av. Insurgentes.
- d. Eliminar los espacios de banqueta marcados en la figura 4.9 como A y B, ya que estos espacios obstaculizan un flujo continuo de vehículos y no representan utilidad alguna ni para peatones ni para vehículos.
- e. Adecuar geométricamente la zona F según la figura 4.10. Esto permitirá tener espacio para estacionar a los microbuses de la ruta 1 impidiendo que estorben la circulación del tercer carril de Av. Insurgentes e impidiendo que obstruyan la zona de estacionamiento de los dos comercios ubicados sobre la misma avenida.



fuente: elaboración propia Agosto 2001

**Figura 4.10**  
Propuesta de modificación al paradero en Dr. Gálvez  
Escala 1 - 455

### 3. Supeditar todo lo demás a la decisión tomada en el paso 2.

Este paso se realiza con la intención de asegurarse que explotar la restricción sea una guía para todas las actividades del sistema. Se requiere mantener a la restricción ocupada a su máxima capacidad.

Con los cambios sugeridos el cuello de botella prácticamente trabaja al 100%. Esta afirmación se da considerando los siguientes aspectos: antes del cuello de botella los vehículos circulan por Av. Insurgentes en tres carriles, con el bloqueo de un carril por los microbuses estacionados se tiene una pérdida del 33.3% en espacio para circular. Al realizar la modificación sugerida se recupera este tercer carril para circular, obteniendo de nuevo el 33.3% de espacio perdido por el bloqueo de un carril. Este 33.3% de capacidad recuperada satisface el 22% de exceso de capacidad que actualmente presenta el cuello de botella.

### 4. Elevar las restricciones del sistema. Todo el esfuerzo que se hace en este paso está encaminado a lograr un mejor desempeño de la restricción respecto de la meta.

En la filosofía de la teoría de restricciones, la "meta " de toda empresa es ganar dinero. Es obvio que en la analogía presentada entre un sistema de producción y el tránsito de vehículos el concepto de ganar dinero no tiene sentido, pero se puede considerar como la meta el no perder dinero. El hecho de que los vehículos estén atrapados en el tránsito representa gasto innecesario de combustible y pérdida de tiempo para las personas,

mismo que se puede traducir en horas-hombre trabajadas. La meta entonces, es no perder dinero al estar perdiendo tiempo en el tránsito.

El desarrollo de este punto sugiere una mejora continua y un seguimiento constante al problema del tránsito.

5. Si en los pasos anteriores se ha violado una restricción, se regresa al paso 1. No debe permitirse que la inercia se convierta en una restricción. Recuerde que las restricciones originales pueden cambiar.

El análisis desarrollado en este trabajo sólo buscó la solución al problema de tránsito en la hora y en el punto más conflictivo de todos los puntos problemáticos que se presentan a lo largo del día. La tabla 2.5 (capacidad, demanda y porcentaje de uso de cada cruce a la hora de máxima demanda vehicular de Av. Insurgentes entre las calles Río San Ángel y Loreto) presentada en el capítulo II indica cuáles son las siguientes restricciones del sistema que se tienen que atacar una vez que se resuelva la peor de todas.

Los pasos de la teoría de restricciones representan un círculo interminable ya que siempre habrá restricciones que solucionar en el sistema. Con la alternativa de solución mostrada en el segundo paso (de los cinco pasos para la aplicación de TOC) se da solución a la mayor de las limitantes en el sistema, solución que permite acercarse a la meta: no perder dinero al estar perdiendo tiempo en el tránsito.

---



## **CAPÍTULO V**

# **RESULTADOS**

### **V.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Se realizó una investigación de campo para obtener estadísticas actualizadas. Esta investigación de campo es de elaboración propia y fue llevada a cabo tomando las siguientes consideraciones:

- Realizada en periodos ordinarios de labores escolares para todos los niveles educativos.
- En días hábiles representativos de la semana (5 días por semana). Aquellos donde no existan factores que afecten el funcionamiento ordinario de las calles, tales como manifestaciones, plantones, accidentes graves o concentraciones masivas de gente (como partidos de fútbol).

El método empleado para la toma de datos fue manual con el apoyo de cámaras de video para poder realizar conteos simultáneos en distintos puntos a la misma hora.

El principal problema vial en el sistema (Av. Insurgentes entre las calles Loreto y Río San Ángel) se da entre las 19:15 y 20:15 horas en Av. Insurgentes sentido norte a sur en su cruce con la calle Doctor Gálvez, donde los vehículos que circulan sobre Insurgentes tienen un exceso en volumen del 22% respecto del volumen de vehículos que pueden circular.

## **V.2 TEORIA DE COLAS**

La teoría de colas se analizó desde dos puntos de vista: un análisis probabilístico y un análisis determinístico.

El análisis probabilístico de las líneas de espera no se recomienda aplicar en un cuello de botella, ya que no se puede usar en aquellas situaciones de máxima demanda en las cuales los flujos de llegadas  $\lambda$  exceden la capacidad en estado estable de servicio  $\mu$ , situación a la que se enfrenta el sistema en el cuello de botella. Además, los modelos básicos de la teoría de colas sólo son válidos para condiciones de estado estable, esto es, sólo son aplicables cuando los patrones de llegadas y servicios se sostienen por largos periodos.

A pesar de esto, se analizó el cuello de botella considerando valores de estado estable. El modelo propuesto para representar el problema es  $E_m/E_k/1$ , pero resulta ser un modelo muy complicado, mismo que en la bibliografía consultada carece de solución. De los modelos con solución, el que más se adecua al sistema es el  $M/D/1$ , pero con la aplicación de este modelo no se tienen resultados coherentes según la observación directa. Además, este modelo es muy sensible a errores en el cálculo de  $\mu$  y  $\lambda$ , ya que con un pequeño error en el cálculo de estas variables se tiene una gran variación en los resultados de  $L_q$ ,  $L$ ,  $W_q$  y  $W$ , por lo cual este modelo no se recomienda aplicar.

El análisis determinístico es el adecuado para obtener el valor de las variables involucradas en un cuello de botella, ya que en situaciones de congestión (o cuellos de botella), donde los patrones de llegada y servicios son altos, este enfoque es el que más se aproxima a describir el fenómeno.

Este análisis determinístico dio los siguientes resultados:

- Hora a la cual empieza el congestionamiento: 19:18 horas.
- Duración del congestionamiento: 1 hora, 22 minutos.
- Número máximo de vehículos en la cola: 397.
- Demora máxima que experimenta un vehículo: 12 minutos.
- Número de vehículos afectados por el cuello de botella: 2,896.

### V.3 JUSTO A TIEMPO

La analogía del sistema de tránsito vehicular con un sistema de producción permite usar la filosofía del JIT para buscar una solución al problema del tránsito. Más que aplicar técnicas y metodologías propias del JIT, el trabajo se enfocó en su filosofía, la cual ayudó al desarrollo de las siguientes propuestas:

- Deberá eliminarse cualquier desperdicio, es decir, aquello que no agrega valor al producto o servicio. El inventario es un desperdicio y en el sistema se ve reflejado en su punto crítico como automóviles que hacen fila para pasar por el cuello de botella. Eliminando el cuello de botella se elimina el inventario o por lo menos se reduce. La solución propuesta para el cuello de botella se desarrolla en la teoría de restricciones, pero obedece a la necesidad de solución que el JIT plantea.
- Los semáforos deben estar sincronizados de tal manera que una estación de servicio no deje pasar material (vehículos) hasta que la siguiente estación de servicio tenga la capacidad para atenderlos.

- Los semáforos deben ser dinámicos. Deben modificar sus tiempos de servicio según la demanda que tenga cada cruce para diferentes combinaciones de movimientos (ya sea de vehículos como de peatones), para cada distinta hora del día y para cada día de la semana.
- Se deben considerar los trabajos urgentes, como son dar prioridad en el servicio de los cruces para ambulancias, patrullas y carros de bomberos.
- Establecer un sistema para superar imprevistos como lo pueden ser un semáforo descompuesto, una inundación o un accidente. Este sistema consiste en avisar a los automovilistas antes de que lleguen a un punto conflictivo para que puedan desviarse. Esta es una adaptación de un sistema kanban.
- Establecer un sistema de control de velocidad que indique a los automovilistas la velocidad ideal a la cual se podrían atravesar ciertos tramos de avenida o vías rápidas en forma continua. Esto evitaría que en un tramo se circule a alta velocidad para llegar a un punto en donde

---

la velocidad se disminuya abruptamente y provoque una acumulación de carros.

El desarrollo de estos puntos en propuestas concretas fundamentadas con un análisis de resultados es muy laborioso y no se considera en el desarrollo de este trabajo. Se consideró que la principal propuesta de solución se da en la eliminación del actual cuello de botella, misma que se detalla en el desarrollo de la teoría de restricciones.

Las propuestas mencionadas cumplen con una filosofía de la administración de la producción (el JIT) que fue creada con el principio básico de aprovechar al máximo el espacio físico y aumentar el rendimiento del sistema, misma premisa que se hace análoga al problema del tránsito. Esto da pie a que se puedan desarrollar estas propuestas en futuros trabajos o investigaciones una vez que ya se tiene esta referencia como antecedente.

## V.4 TEORÍA DE RESTRICCIONES

En la definición del problema se localiza el punto más conflictivo en el sistema, mismo que representa un cuello de botella. El análisis de los cuellos de botella lo desarrolla la teoría de restricciones. El desarrollo de los 5 pasos propuestos por la teoría de restricciones llevó a una solución concreta que se resume en una adecuación geométrica del paradero de microbuses en la calle Dr. Gálvez. El mapa actual del paradero y la propuesta de solución se muestran en las figuras 4.9 y 4.10 respectivamente.

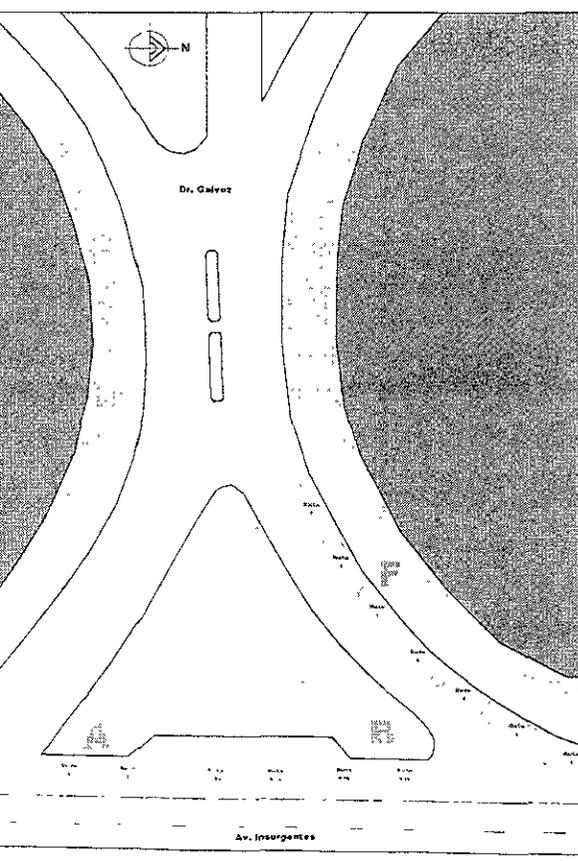


Figura 4.9  
Mapa actual del paradero de microbuses en Dr. Gálvez

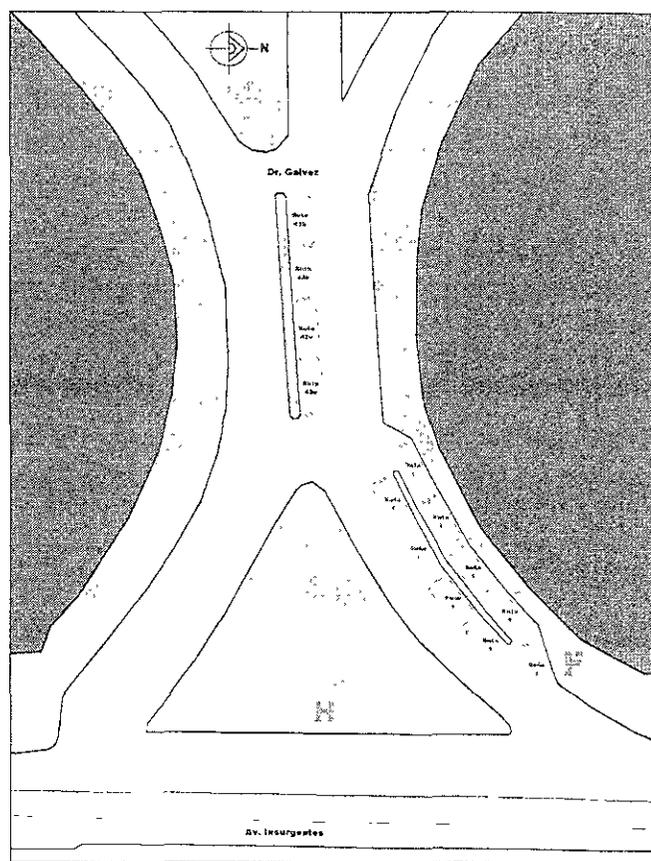


Figura 4.10  
Propuesta de mejoras al paradero de microbuses en Dr. Gálvez

CUADRO 5.1

VENTAJAS, DESVENTAJAS Y CAMBIOS INVOLUCRADOS EN LA APLICACIÓN DE LAS MEJORAS AL PARADERO DE MICROBUSES EN DR. GÁLVEZ.

VENTAJAS	DESVENTAJAS	CAMBIOS INVOLUCRADOS
<p>eliminación del cuello de botella con un mínimo de inversión. Dos de los tres carriles de Av. Insurgentes presentarían flujo continuo. El tercer carril sólo presentaría un decremento en la velocidad de circulación debido a los vehículos que después de tener un descenso de pasajeros se incorporan a este carril.</p> <p>El descenso de pasajeros sobre Av. Insurgentes es más seguro ya que se realizaría sobre una banqueta.</p> <p>Actualmente el descenso de pasajeros se realiza entre filas de microbuses estacionados en doble fila.</p> <p>Se eliminarían aproximadamente 160 puestos ambulantes ubicados en esta zona sólo sería necesario reubicar a dos.</p> <p>Se elimina el bloqueo de los accesos a estacionamientos de dos comercios.</p> <p>No se afectan áreas verdes ni entradas a estacionamientos.</p>	<p>Reubicación de un puesto ambulante y un puesto de periódicos.</p> <p>Posible negación a reubicar la zona de ascenso de pasajeros de 3 rutas que ocupan una posición privilegiada sobre Av. Insurgentes</p>	<p>Modificación de 210 m<sup>2</sup> de banqueta.</p> <p>Modificar la ubicación de 2 postes de alumbrado y 2 postes de teléfonos.</p> <p>Cambio en la zona de ascenso de pasajeros para 3 rutas de microbuses.</p>

Fuente: elaboración propia

ESTADÍSTICAS  
DE LA CIUDAD DE  
MEXICO

Esta propuesta elimina la mayor de las restricciones presentadas en el sistema. Una vez implantada deben repetirse los 5 pasos que la teoría de restricciones sugiere para buscar de manera permanente una mejora continua. La meta en la aplicación de esta teoría es no perder dinero al no desperdiciar gasolina ni tiempo en el tránsito.

## V.5 JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

Se le llama proyecto público a aquellos proyectos autorizados, financiados y operados por agencias federales, estatales y del gobierno local. El proyecto presentado en este trabajo es de naturaleza pública.

Las principales diferencias entre proyectos de propiedad privada y los de propiedad pública son<sup>19</sup>:

	Proyecto privado	Proyecto público
Propósito	Proporcionar bienes y/o servicios; maximizar la utilidad o minimizar el costo.	Proteger la salud, proteger vidas y propiedades, proporcionar servicios (sin utilidad), proporcionar trabajos.

<sup>19</sup> DE GARMO, Paul E., et-al, Ingeniería Económica, Prentice Hall, 1998, p.240.

	Proyecto privado	Proyecto público
Naturaleza de los "beneficios"	Monetaria o relativamente fácil de igualar a términos monetarios.	Con frecuencia no monetarios, dificultad para cuantificar, dificultad para igualar a términos monetarios.
Beneficiarios del proyecto	Principalmente la entidad que emprende el proyecto.	Público en general.
Conflicto de propósitos	Moderado.	Bastante común.
Conflicto de intereses	Moderado.	Muy común.
Medición de la eficiencia	Tasa de rendimiento sobre el capital.	Muy difícil; no hay comparación directa con los proyectos privados.

Como consecuencia de estas diferencias, suele ser difícil realizar estudios de ingeniería económica y tomar decisiones de inversión para proyectos de obras públicas exactamente de la misma forma que para proyectos de propiedad privada.

En la mayoría de los casos no se pueden llevar a cabo estudios económicos tan completa, amplia y satisfactoriamente como en el caso de estudios de proyectos financiados por la iniciativa privada. En el sector privado, los costos son pagados por la empresa que se encarga del proyecto y los beneficios son los resultados, favorables del proyecto acumulados por la empresa. Pero en el caso de los proyectos del sector público, la simple

enumeración de todos los beneficios es una gran tarea, además, se debe estimar de alguna forma el valor monetario de estos beneficios para todos los segmentos del público afectados.<sup>20</sup>

Algunas dificultades inherentes a los proyectos públicos que se deben de considerar al realizar estudios de ingeniería económica y al tomar decisiones económicas con respecto a estos proyectos son:

1. No hay una utilidad estándar que pueda tomarse como una medida de eficacia financiera. La mayoría de los proyectos públicos tienen la intención de ser no lucrativos.
2. Es difícil cuantificar el impacto monetario de muchos de los beneficios de los proyectos públicos.
3. La tasa de interés apropiada para evaluar los proyectos públicos con frecuencia es motivo de controversia y despierta sensibilidades políticas. A tasas de interés más bajas favorecen proyectos a largo plazo con mayores beneficios sociales y/o monetarias a futuro.

El método más utilizado por el gobierno para analizar la rentabilidad o conveniencia de un proyecto público y para seleccionar alternativas, es el método de la razón beneficio/costo (B/C).

---

<sup>20</sup> DE GARMO. Paul E , et-al, Ingeniería Económica, Prentice Hall, 1998, p.244-245.

Como su nombre lo indica, el método de la razón beneficio/costo implica el cálculo de una razón de los beneficios del proyecto con respecto a sus costos. Los beneficios del proyecto son las consecuencias favorables del proyecto para el público, pero los costos del proyecto representan el (los) desembolso(s) monetario(s) requerido(s) del gobierno. Se debe considerar el valor temporal del dinero para explicar el calendario de flujos de efectivo que ocurren desde la realización del proyecto.

La razón beneficio/costo se define como la razón del valor equivalente de los beneficios con respecto al valor equivalente de los costos. En algunas agencias gubernamentales también se conoce como la *razón de ahorros-inversión (RA)*.

Un proyecto se considera atractivo y se justifica económicamente cuando los beneficios expresados en términos monetarios derivados de su realización exceden a sus costos asociados <sup>21</sup>; es decir, cuando la relación entre ambos es mayor a o igual a 1.

$$\frac{\text{Beneficios}}{\text{Costos}} \geq 1$$

<sup>21</sup> BLANK, T. Leland, et-al, Engineering Economy, McGraw-Hill, 1998, p 266

## Paso 1. Determinar el costo total del proyecto.

Se hicieron tres cotizaciones en lo que se refiere a las obras en aceras y carpeta asfáltica, como son la demolición de banquetas, reposición de la carpeta asfáltica y construcción de una isleta de concreto. La descripción detallada de las cotizaciones se encuentra en el Anexo 4.

Las tres empresas consultadas fueron: Caminos, Carpetas, Obras y Pavimentos; JOANSA Construcciones y Constructora MAL, S.A., cuya cotización es la siguiente:

PROVEEDOR	Costo total por obras en aceras y carpeta asfáltica
Caminos, Carpetas, Obras y Pavimentos	\$80,081.92
JOANSA Construcciones	\$74,491.46
Constructora MAL, S.A.	\$86.660.70

Se eligió como proveedor del material y mano de obra para realizar las obras en aceras y carpeta asfáltica a la empresa JOANSA Construcciones por presentar el costo más bajo. Al costo total del proyecto hay que agregar el costo de reubicación de dos postes de teléfono, dos postes de alumbrado y

el costo de extensiones de cable telefónico (cuya descripción se encuentra en el Anexo 4).

Costo de obra en aceras y carpeta asfáltica	\$ 74,491.46
Costos por reubicación de postes telefónicos	\$ 6,978.15
Costos por reubicación de postes de alumbrado	\$ 3,929.60
<hr/>	
Costo total del proyecto	\$ 85,399.21

## Paso 2. Definir el horizonte de planificación.

El horizonte de planificación es el tiempo de vida útil del proyecto. Para obtener este dato se hicieron las siguientes consideraciones:

1. La vida útil es el tiempo que tarde el proyecto, una vez implementado, en alcanzar las condiciones actuales. Es decir, cuando la demanda rebase en 22% a la capacidad (según resultados de la Tabla 2.5 capítulo II).
2. La tasa de crecimiento de la demanda en el cuello de botella es igual a la tasa de crecimiento del parque vehicular de la ciudad de México.

La tasa de crecimiento del parque vehicular de la ciudad de México es del 5.55 % anual. Este dato se obtuvo de la siguiente manera: en 1998 había 3 millones de vehículos en la ciudad de México y el pronóstico para el año

2010 es de 5 millones<sup>22</sup>. En 12 años se pronostica un incremento del 66.6 %, por lo tanto, la tasa de incremento anual (66.6 % / 12 años) es del 5.55 %.

Con esta tasa de crecimiento y la demanda actual de vehículos en el cuello de botella (Tabla 2.5, capítulo II) se obtienen los siguientes datos:

Tabla 5.5.1

PRONÓSTICO DE DEMANDA VEHICULAR EN EL CUELLO DE BOTELLA

Año	Demanda	% de incremento acumulado
2001	2,260	
2002	2,385	5.55
2003	2,511	11.10
2004	2,636	16.65
2005	2,762	<b>22.20</b>
2006	2,887	27.75
2007	3,013	33.30
2008	3,138	38.85

El proyecto tendrá una vida útil de 4 años; hasta el 2005, año donde abra un incremento acumulado de la demanda de un 22.2 % y las condiciones de tránsito vehicular serán iguales a las del año actual.

<sup>22</sup> <http://www.cepis.ops-oms.org/busci/e/fulltext/2encuent/mexico1.pdf>, 2° Encuentro Latinoamericano de Calidad del Aire y Salud, octubre 2000. Instituto Nacional de Ecología.

### Paso 3. Determinar los beneficios a la población.

Se tomaron como beneficios para la población el ahorro en gasolina y el no desperdicio de horas/hombre. Otros posibles beneficios son muy difíciles de cuantificar, tales como: menos estrés en los conductores y reducción de la contaminación.

#### a) Ahorro en gasolina

- i. Velocidad promedio. Considerando que la distancia del tramo bajo estudio es de 400 m y el tiempo promedio que se tarda un automóvil en atravesarlo es de 6 minutos:

$$\text{Velocidad} = \text{distancia} / \text{tiempo}$$

$$\text{Velocidad} = 400 / 6 = 66.6 \text{ m/min} = 4 \text{ Km/h}$$

- ii. Se consideraron 14 km/l como el rendimiento promedio en gasolina de un automóvil. Este dato es un promedio entre el rendimiento de vehículos de lujo como los modelos Cutlass (12.14 km/l), Grand Voyager (9.36 km/l), Century (11.6 km/l) y modelos de automóviles económicos como Tsuru (18 km/l), Chevy (17 km/l) y VW Sedan (14.6 km/l).

- iii. Con los datos de los puntos i y ii se calcula el combustible que gasta un automóvil por hora en dichas condiciones:

$$\text{Gasto de combustible por hora} = \frac{4 \text{ km/h}}{14 \text{ km/l}} = 0.2857 \text{ l/h}$$

- iv. Se obtiene el gasto en gasolina de un automóvil al atravesar el cuello de botella en los 6 minutos.

$$\text{Gasto de combustible} = \left[ \left( 0.2857 \frac{\text{l}}{\text{h}} \right) \left( \frac{\text{h}}{60 \text{ min}} \right) (6 \text{ min}) \right] =$$

$$\text{Gasto de combustible} = 0.02857 \text{ l}$$

- v. Según el análisis determinístico de la teoría de colas, el número de vehículos afectados por el cuello de botella es igual a 2,896 vehículos. Por lo tanto, la cantidad de litros de gasolina consumidos en los 6 minutos, que es el tiempo promedio que tarda un automóvil en cruzar el cuello de botella es:

$$\text{Combustible consumido} = (0.02857) (2,896) = 82.74 \text{ l}$$

Para obtener el ahorro en gasolina se considera una velocidad promedio de 50 Km/h, a dicha velocidad un vehículo se tarda 28.8 seg en recorrer 400 m.

$$\text{Tiempo} = \frac{\text{distancia}}{\text{velocidad}} = \frac{0.4 \text{ km}}{50 \text{ km/h}} = (0.008 \text{ h}) \left( 3600 \frac{\text{seg}}{\text{h}} \right) = 28.8 \text{ seg}$$

Esto representa un ahorro en tiempo del 92%. Aplicando este porcentaje de ahorro en tiempo al ahorro en combustible se tiene:

$$\text{Ahorro de combustible} = 76.12 \text{ l}$$

- vii. El precio de la gasolina Magna es de \$ 5.52 /l, entonces el beneficio total para la población en lo que se refiere al ahorro de gasolina es de:

$$\text{Ahorro de combustible por hora} = (\$ 5.52 /\text{l}) (76.12 \text{ l}) = \$420.18$$

Calculado para todo un año:

$$\text{Ahorro de combustible por año} = (\$420.18) (260 \text{ días hábiles})$$

$$\boxed{\text{Ahorro anual de gasolina} = \$109,246.80}$$

b) Ahorro en horas / hombre.

- i. El salario mínimo en el Distrito Federal es de \$40.35 diarios. Dividido entre 8 horas, se tienen \$5.044 por hora, si se divide dicha cantidad entre 60, el salario mínimo por minuto es de \$0.084. Considerando que se pierden diariamente 6 minutos en el cuello de botella, se tiene una pérdida total de \$0.504 por automóvil.
- ii. Considerando un trabajador por cada automóvil y siendo 2,896 automóviles que se verían beneficiados por la eliminación del cuello de botella, entonces:

$$\text{Ahorro total diario} = (2,896) (\$ 0.504) = \$1,459.58$$

iii. El ahorro al año sería entonces:

$$\text{Ahorro total anual} = (\$ 1,459.58) (260 \text{ días hábiles}) = \$379,490.80$$

$$\text{Ahorro anual por horas/hombre} = \$379,490.80$$

#### Paso 4. Realizar la evaluación económica

Una vez convertidos en unidades monetarias los costos y los beneficios y antes de obtener la razón beneficio/costo se obtiene su valor presente VP, ya que se necesita la medida del valor equivalente tanto de los beneficios como de los costos. El método del valor presente (VP) consiste en traer del futuro al presente cantidades monetarias a su valor equivalente. El término equivalencia significa tener igual valor o comparar en condiciones similares un valor.

Figura 5.5.2  
Diagrama de flujo  
COSTOS

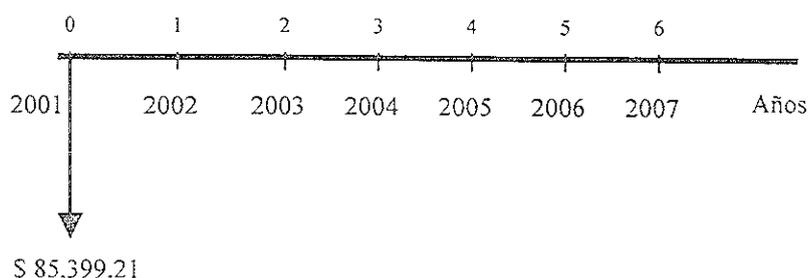
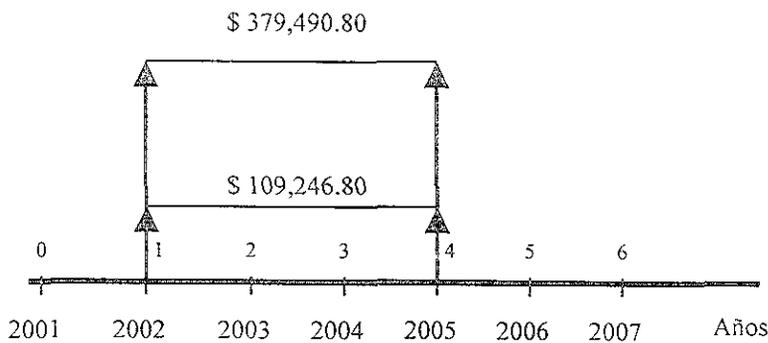


Figura 5.5.3  
Diagrama de flujo  
BENEFICIOS



En otras palabras, el método del valor presente (VP) se basa en el concepto de valor equivalente de todos los flujos de efectivo relativos a alguna base o punto de inicio en el tiempo llamado presente, es decir, todos los flujos entrantes y salientes de efectivo se anticipan al punto presente en el tiempo a una tasa de interés. Un VP positivo para un proyecto de inversión es un monto de utilidad sobre el monto mínimo requerido por los inversionistas.

La razón B/C convencional con VP es

$$B/C = \frac{VP(\text{beneficios del proyecto propuesto})}{VP(\text{costos totales del proyecto propuesto})} = \frac{VP(B)}{VP(C)}$$

El proyecto resulta rentable o económicamente ventajoso, si la razón del valor presente de los beneficios  $VP(B)$  con respecto al valor presente de los costos  $VP(C)$  es mayor o igual a uno.

$$\frac{VP(B)}{VP(C)} \geq 1$$

Observado el diagrama de flujo de los costos (figura 5.1.2), su valor presente no varía.

En cambio en el diagrama de flujo de beneficios (figura 5.1.3), se puede ver que se trata de la adición de dos series aritméticas (A), las cuales son un conjunto de flujos del mismo valor (uniformes), los cuales se inician un periodo después del origen de esa serie. Para obtener el presente (P) dada una serie A, se utiliza el factor de transformación (P/A, i%, n), conocido con el nombre de factor de valor presente de una serie uniforme, que es igual a:

$$(P/A, i\%, n) = \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$$

Donde n es el número de periodos, los cuales son igual a 4. La tasa de interés ( i% ) ayuda a considerar el valor temporal del dinero, a la cual se le

dio el valor de la inflación promedio del año 2000 dada a conocer por el Banco de México, misma que fue del 10.08%.

Los valores de los diferentes factores de transformación también se pueden obtener de las tablas de interés y anualidades para capitalización discreta, pero el problema de dichas tablas es que sólo manejan ciertas tasas de interés.

- $VP(C) = \$ 85,399.21$
- $VP(B) = (379,490.80 + 109,246.80) (P/A, i\%, n)$

Donde la tasa de interés  $i$  se consideró como la inflación pronosticada para el año 2001 que es de 10.08% y  $n$  es el número de periodos, los cuales son iguales a 4.

$$(P/A, i\%, n) = \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$$

$$(P/A, 10.08\%, 4) = \left[ \frac{(1+0.1008)^4 - 1}{0.1008(1+0.1008)^4} \right] = 3.164$$

$$VP(B) = (488,737.60) (3.164) = 1,546,365.77$$

- $VP_B / VP_C = 1,546,365.77 / 85,399.21 = 18.1$

$$\boxed{VP_B / VP_C = 18.1}$$

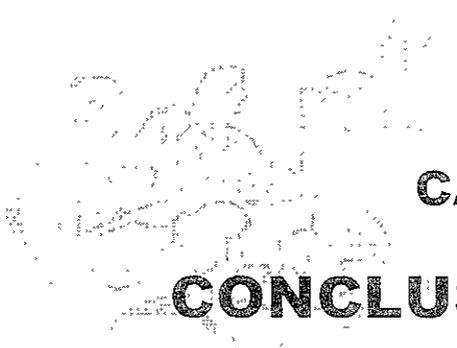
⇒ El proyecto sí es rentable

Por cada peso que se invierta por el gobierno la población gana \$18.10.

En resumen, la inversión requerida se recupera en el primer año de operación del proyecto, teniendo 3 años de obtención de beneficios. Se cumplió el objetivo de obtener una solución eficiente de bajo costo, ya que los costos se ven rebasados por los beneficios desde el primer año.

Una manera de dejar en claro la rentabilidad del proyecto es el hecho de que por cada peso que el gobierno aportara para el presente proyecto la población ganaría \$18.10.

---



## **CAPÍTULO VI**

# **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La inquietud de aplicar conceptos propios de la ingeniería industrial para encontrar la solución a problemas reales de un área no propia de esta rama de la ingeniería llevó al desarrollo del presente trabajo, obteniendo analogías y resultados muy satisfactorios. Al aplicar la filosofía del JIT y el TOC en el desarrollo de soluciones a problemas de tránsito se obtienen ideas interesantes y estratégicas.

La aplicación del análisis determinístico de la teoría de colas, propia de la investigación de operaciones, sí es aplicable y tuvo resultados muy satisfactorios. Por el contrario, el análisis probabilístico de la teoría de colas en un fenómeno de tránsito en la ciudad no se recomienda aplicar ya que es muy difícil que se tengan condiciones de estado estable.

El objetivo del trabajo se cumplió, ya que se presenta una propuesta que soluciona un conflicto de tránsito que afecta a casi 3,000 vehículos durante una hora 22 minutos, solucionando con esto que cada automovilista no tenga que esperar un promedio de 6 minutos para cruzar un tramo de aproximadamente 400 m.

El desarrollo de la teoría de restricciones conduce a una solución de aparentemente simplicidad: una adecuación geométrica de las aceras. Sin embargo esta es la mejor solución al mayor de los problemas de tránsito vehicular sobre Av. Insurgentes en el tramo de estudio. La verdadera importancia de este trabajo consiste en las recomendaciones obtenidas debido a la aplicación de la teoría justo a tiempo; recomendaciones que son de aplicación general para la solución a problemas de tránsito vehicular:

1. Se deben eliminar los cuellos de botella.
2. Los semáforos deben estar sincronizados de tal manera que una estación de servicio no deje pasar vehículos hasta que la siguiente estación de servicio tenga la capacidad para atenderlos.
3. Los semáforos deben ser dinámicos. Deben modificar sus tiempos de servicio según la demanda que tenga cada cruce para diferentes combinaciones de movimiento de vehículos y de peatones.

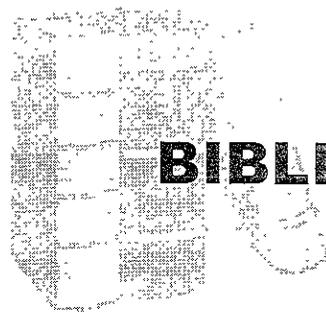
4. Dar prioridad en el servicio de los cruceros a ambulancias, patrullas y carros de bomberos.
5. Establecer un sistema para avisar a los automovilistas antes que lleguen a un punto conflictivo y tengan la opción de desviarse.
6. Establecer un sistema de control de velocidad que indique a los automovilistas la velocidad ideal a la cual se podrían atravesar ciertos tramos de avenida o vías rápidas en forma continua. Esto evitaría que en un tramo se circule a alta velocidad para llegar a un punto en donde la velocidad se disminuya abruptamente y provoque una acumulación de automóviles.

La razón de fondo en el problema del tránsito es el exceso de vehículos que necesitan circular por vialidades insuficientes. Pero este trabajo demuestra que se pueden obtener soluciones que aprovechen al máximo las condiciones existentes con un mínimo de obra material obteniendo resultados satisfactorios.

Las recomendaciones mencionadas no servirían de nada si no se cuenta con la participación de la ciudadanía. Es muy triste ver la falta de educación vial que demuestran muchas personas al darse vuelta en zonas prohibidas, no respetar las áreas peatonales, acelerar cuando el semáforo está en

amarillo, tratar siempre de meterse en la fila que espera en forma ordenada para dar vuelta, etc. Falta mucha conciencia social para poder establecer sistemas innovadores y que den grandes resultados.

Una de las visiones más valiosas que dejó el desarrollo de este trabajo fue el comprobar de que la teoría, metodologías, técnicas y/o filosofías aprendidas a lo largo de la carrera no son recetas que resuelven problemas. El verdadero detonador para encontrar las mejores soluciones a problemas es el ingenio. La teoría da herramientas que ayudan a sintetizar y analizar problemas, pero el ingenio basado en la perseverancia es el que en realidad hace visualizar las mejores soluciones, concretas y tangibles.



## BIBLIOGRAFÍA

ARNAL, Simon Luis, BETANCOURT, Max, Reglamento de construcciones para el D.F., Trillas 2ª edición, México, 1994.

BLANK, T. Leland, TARQUIN, J. Anthony, Engineering Economy, 4ª edición, McGraw-Hill, 1998.

BOX, Paul C., OPPENLANDER, Joseph C., Manual de estudios de Ingeniería de Tránsito, Representaciones y servicios de Ingeniería, 4ª edición, México, 1985.

CAL Y MAYOR, Rafael, CÁRDENAS, G. James, Ingeniería de tránsito, edit. Alfaomega, México, 1994, 7ª. Edición.

CÁRDENAS, G. James, Diseño Geométrico de Vías, Ecoe Ediciones, Universidad del Valle, Colombia, 1993.

DE GARMO, Paul E., et-al, Ingeniería Económica, 10ª edición, Prentice Hall, 1998.

Dirección General de Obras Públicas del Gobierno del Distrito Federal.  
Proyecto Intersección de Flujo Continuo, marzo/2000.

FOGARTY, W. Donald, et-al, Administración de la Producción e Inventarios, Compañía Editorial Continental, Segunda edición, 1995.

GELENBE, E., PUJOLLE, G., Introduction to Queueing Networks, edit. John Wiley & Sons, France, 1987.

HILLIER , Frederick S. y LIEBERMAN, Gerald J., Introducción a la Investigación de Operaciones, Mc Graw Hill, 5ª edición, 1991.

INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS. Membership Directory, Washington.D.C., 1991.

LAZO, Leonardo Margánin, et-al, Una Fisonomía de la Ingeniería de tránsito, edit. Miguel Ángel Porrúa, México, 1981.

MARIN, Pinillos, Benito, Investigación de Operaciones I, UNAM, Facultad de Ingeniería, México, 1994.

SIPPER, Daniel, et-al, Planeación y Control de la Producción, Mc Graw-Hill, 1998.

TAHA, Hamdy A., Investigación de Operaciones, Alphaomega, 3ª edición, 1991.

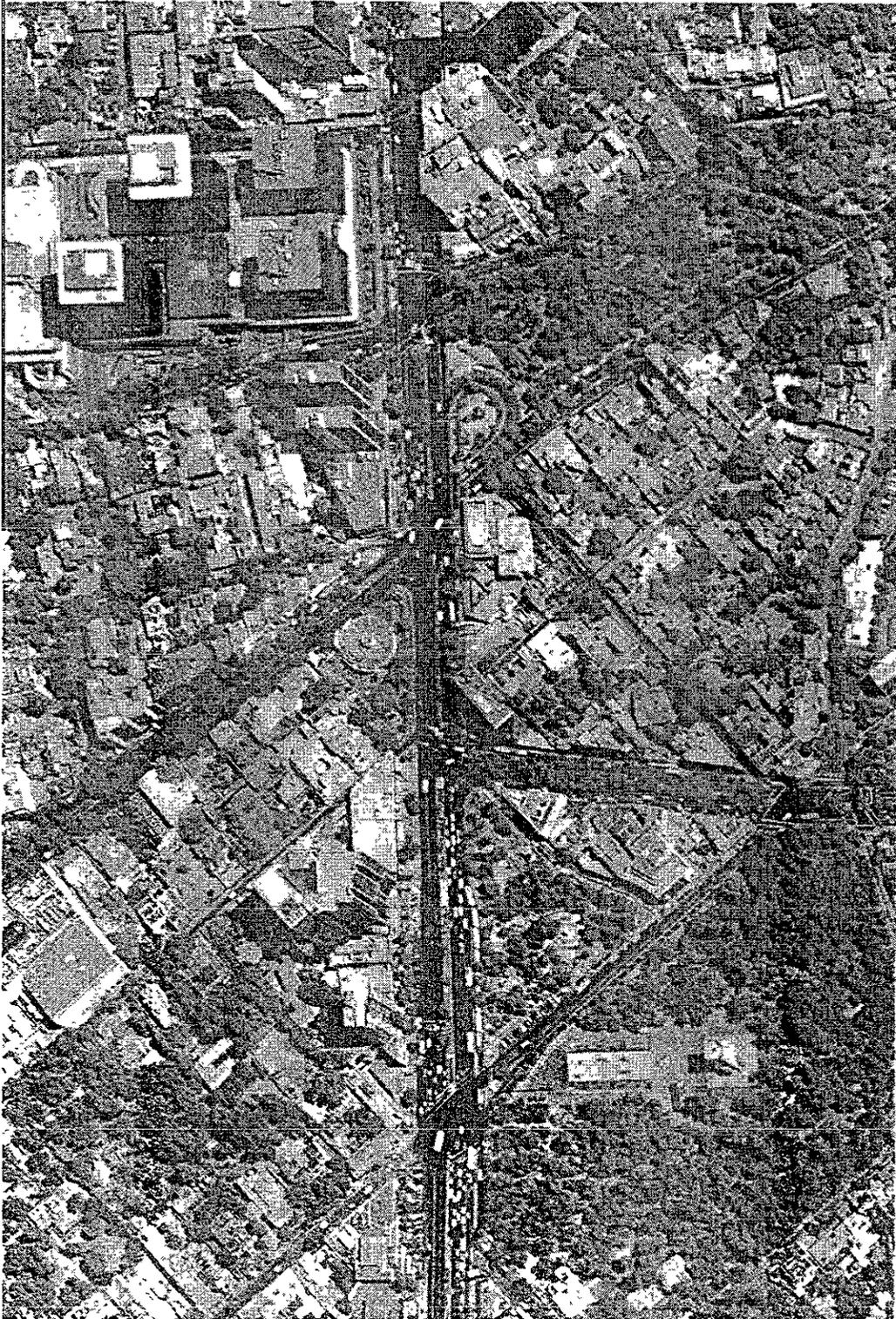
PÁGINAS DE INTERNET CONSULTADAS:

<http://www.geocities.com/WallStreet/Brokerage/8040/jit.html>  
<http://www.infodoctor.org/bandolera/i6s-3.html>  
<http://calidad.bizhosting.com/toc/indice.html>  
<http://www.cimatic.com.ar/toc/articulos/debernardo2.html>  
<http://www.cimatic.com.ar/toc/articulos/suministro.html>  
<http://www.cepis.ops-oms.org/busci/e/fulltext/1encuent/conama.pdf>  
<http://www.cepis.ops-oms.org/busci/e/fulltext/2encuent/mexico1.pdf>  
[http://www.conasami.gob.mx/sal\\_pro.htm](http://www.conasami.gob.mx/sal_pro.htm)  
<http://www.shcp.gob.mx/estruct/unicoms/boletin/2001/b0501.html>  
<http://dgcnesyp.inegi.gob.mx/bie.html-ssi>

# ANEXO 1

## FOTOGRAFÍA AÉREA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Abril 2001



A

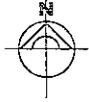
A'

**FOTOGRAFÍA AEREA DE LA ZONA DE ESTUDIO  
(CONTINUACIÓN)**

A



A'



## ANEXO 2

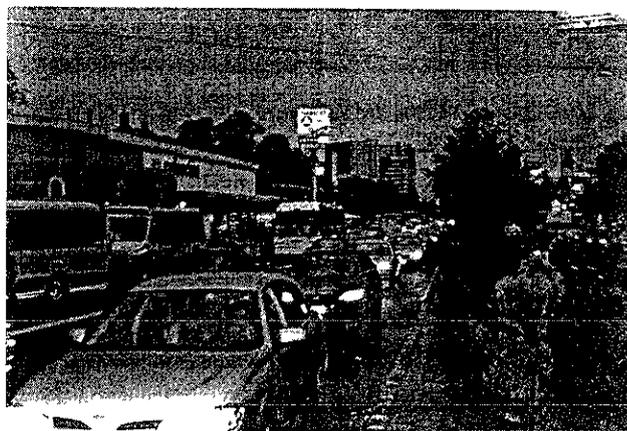
### IMÁGENES DE AV. INSURGENTES SENTIDO NORTE A SUR CRUCE CON EL PARADERO DE MICROBUSES EN LA CALLE DR. GÁLVEZ A LA HORA DE MÁXIMA DEMANDA DE TRÁNSITO VEHICULAR



**Foto no. 1**

19:50 horas, agosto 2001

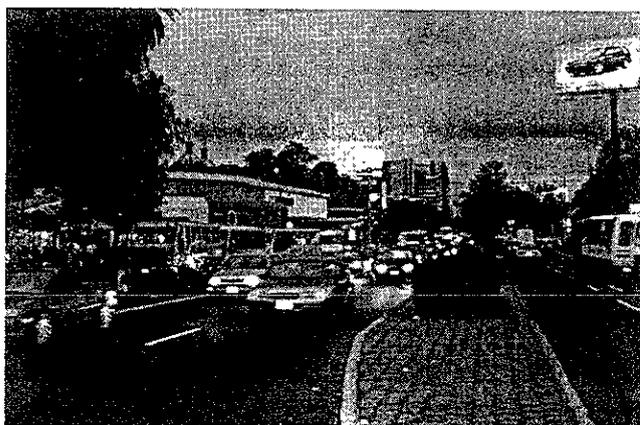
Se observan los tres carriles de Av. Insurgentes, de los cuales dos se obstruyen por microbuses que ascienden y bajan pasajeros.



**Foto no. 2**

20:10 horas, agosto 2001

La fila de vehículos se extiende a más de 400 m afectando a casi 2,000 automovilistas. Av. Insurgentes se obstruye por microbuses que se estacionan en el tercer carril.



**Foto no. 3**

20:05 horas, agosto 2001

Cuello de botella: antes del paradero de microbuses hay un exceso de vehículos acumulados, después del paradero los vehículos pueden circular de manera fluida.

# ANEXO 3

## REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES PARA EL DISTRITO FEDERAL ARTÍCULOS 6, 10, 18 Y 34 <sup>23</sup>

Art. 6. Vía Pública es todo espacio de uso común que por disposición del Departamento, se encuentre destinado al libre tránsito, de conformidad con las leyes y reglamentos de la materia, así como todo inmueble que de hecho se utilice para ese fin. Es característica propia de la vía pública el servir para la aereación, iluminación y asoleamiento de los edificios que la limiten, para dar acceso a los predios colindantes, o para alojar cualquier instalación de una obra pública o de un servicio público.

Art. 10. Las dependencias y entidades públicas, así como las personas privadas cuyas actividades de planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de estructuras tengan algún efecto en la vía pública, deberán presentar al Departamento al inicio de cada ejercicio anual sus programas de obras para su aprobación.

Art. 18. El Departamento establecerá las restricciones para la ejecución de rampas en guarniciones y banquetas para la entrada de vehículos, así como las características, normas y tipos para las rampas de servicio a personas impedidas y ordenará el uso de rampas móviles cuando corresponda.

Mínimo 1.50 m para el ancho de la banqueta. La pendiente no será mayor del 5%. No hacer pendientes para bajar en la esquina.

Las banquetas no podrán cambiar de pendiente, material de construcción y acabado, dimensiones, ornato, etc.- salvo en los casos en que el D.D.F. lo acepte.

Art. 34. El Departamento establecerá en los Programas Parciales las restricciones que juzgue necesarias para la construcción o para uso de los bienes inmuebles ya sea en forma general, en fraccionamientos, en lugares o en predios específicos, y las hará constar en los permisos, licencias o constancias de alineamiento o zonificación que expida, quedando obligados a respetarlas los propietarios o poseedores de los inmuebles, tanto públicos como privados.

Estará prohibido el derribo de árboles, salvo en casos expresamente autorizados por el Departamento, independientemente de cumplir, en su caso, con lo establecido por la Ley Forestal y su reglamento, así como las demás disposiciones legales aplicables a la materia.

---

<sup>23</sup> ARNAL, Simon Luis, et-al, *Reglamento de construcciones para el D F.*, Trillas 2ª edición, México, 1994.

# ANEXO 4

## COSTOS DE OBRA EN ACERAS Y CARPETA ASFÁLTICA

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD REQUERIDA	PROVEEDORES					
			Caminos, Carpetas, Obras y Pavimentos.		JOANSA Construcciones		Constructora MAL, S A.	
			Costo unitario	Total	Costo unitario	Total	Costo unitario	Total
Demolición a mano de firmes de concreto simple Incluye carga manual, acarreo del material producto de la demolición a tiro libre y todo lo necesario para su correcta ejecución	m <sup>2</sup>	214	\$17 09	\$3,657 26	\$21 10	\$4,515.40	\$15 22	\$3,257 08
Demolición a mano de guarniciones de concreto simple de sección 15x20x50. Incluye carga manual, acarreo del material producto de la demolición y todo lo necesario para su correcta ejecución	m	172	\$20 89	\$3,593 08	\$16.88	\$2,903 36	\$21 44	\$3,687 68
Carga, acarreo y descarga en camion de materiales tipo II y III, cascajo o material producto de demolición a tiro libre	m <sup>3</sup>	70	\$99 37	\$6,955 90	\$84 90	\$5,943 00	\$104 71	\$7,329 70
relleno con material de banco, tepetate, compactado con equipo mecánico al 95% de la prueba PROCTOR estándar, en capas no mayores a 20 cms incluye suministro de tepetate, carga y acarreo del material, descarga, pruebas de compactación, material, mano de obra, herramienta y equipo	m <sup>3</sup>	82	\$124 10	\$10,176 20	\$130 86	\$10,730 52	\$160 42	\$13,154 44
Deposición de carpeta asfáltica de 7 cm de espesor. Incluye todas las herramientas necesarias para su correcta ejecución	m <sup>2</sup>	49	\$147 68	\$7,236 32	\$134 50	\$6,590 50	\$242 10	\$11,862 90
Fabricación de piso de 10 cms. de espesor de concreto C = 200 kg/cm <sup>2</sup> , Resistencia Normal, T M A 3/4" Revenimiento 10 cm, armado con malla electrosoldada 6x6/10-10, tabado lavado en tablados no mayores de 3x3 m Volteador en Ansta	m <sup>2</sup>	182	\$141 60	\$25,771 20	\$129 20	\$23,514 40	\$139 33	\$25,358 06
Guarnición de concreto C = 200 kg/cm <sup>2</sup> , R N , T M A 3/4" fabricado en obra, de sección trapezoidal 15X20 cms y 50 cm de alto Incluye materiales, desperdicios, mano de obra y herramienta, cimbrado y descimbrado	m	172	\$131 93	\$22,691 96	\$117 99	\$20,294 28	\$127.97	\$22,010 84
<b>TOTAL</b>				<b>\$80,081.92</b>		<b>\$74,491.46</b>		<b>\$86,660.70</b>

Fuente: Dirección General de Obras (DGO) de la Universidad Nacional Autónoma de México  
Septiembre, 2001.

## COSTOS POR REUBICACIÓN DE POSTES TELEFÓNICOS

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD REQUERIDA	COSTO UNITARIO	TOTAL
Reubicar postes telefónicos.	c u	2	\$3,000.00	\$6,000.00
Cablado telefónico Cable ASPB de 30 pares	m	15.5	\$9.26	\$143.53
Caja secundaria para punto de distribución	c.u	2	\$417.31	\$834.62
TOTAL				\$6,978.15

Fuente: Teléfonos de México (TELMEX)  
Septiembre, 2001.

## COSTOS POR REUBICACIÓN DE POSTES DE ALUMBRADO

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD REQUERIDA	COSTO UNITARIO	TOTAL
Reubicación de poste de alumbrado ya instalado Incluye todos los movimientos necesarios (equipo y personal) para la correcta reinstalacion y reubicación del poste a remover	c u	2	\$1,964.80	\$3,929.60
TOTAL				\$3,929.60

Fuente: NORTEL  
Septiembre, 2001.