



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis del flujo vehicular propuesta de un
modelo alternativo macroscópico**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA**

**PRESENTA:
ORLANDO VILLAFAN CONDE**

**DIRECTOR:
Dr. Martín Salazar Villanueva**

PUEBLA, PUE

Noviembre 2023



BUAP

No. de Oficio SAC/2279/2023

**C. Orlando Villafan Conde -201632215-
Pasante de Licenciatura en Ingeniería
Mecánica y Eléctrica
Presente.**

En atención a la Memoria de Experiencia Profesional que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“ANÁLISIS DEL FLUJO VEHICULAR PROPUESTA DE UN MODELO ALTERNO MACROSCÓPICO”.

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como director de tema al Dr. Martín Salazar Villanueva.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Z. a 23 de noviembre de 2023

**M. I. Angel Cecilia Guerrero Zamora
Director**



**M'ACGZ /barv
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo**

Facultad
de Ingeniería

Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
222 229 55 00 Ext. 7610

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Presente.

El que suscribe: Dr. Martín Salazar Villanueva, director del tema de tesis:

“ANÁLISIS DEL FLUJO VEHICULAR PROPUESTA DE UN MODELO ALTERNO MACROSCÓPICO”.

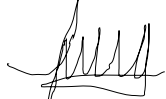
Presentada por el C. Orlando Villafan Conde -201632215-, pasante del Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, y en atención al oficio No. SAC/2279/2023 con fecha de emisión 23 de noviembre de 2023, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

Atentamente

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Z. a 24 de noviembre de 2023



Dr. Martín Salazar Villanueva
Director de Tema

Dedicatoria

A mis padres, por el apoyo incondicional.
Las personas más importantes de mi vida.
Por ellos y para ellos todo mi esfuerzo y dedicación.

Índice general

Capítulo 1 Definición del problema	2
Introducción	2
Descripción del problema	3
Contaminación vehicular	4
Objetivo general.....	5
Objetivos particulares	5
Justificación.....	5
CAPITULO 2 Descripciones	6
Definición de simulación	6
Definición de modelo	6
Modelo macroscópico.....	7
Modelo matemático	8
Modelo matemático y el flujo vehicular	8
Velocidad.....	9
Densidad	9
Flujo.....	9
Tráfico	9
Relación entre demanda vehicular y la oferta vial	11
Factores que intervienen en el problema de tránsito	12
Marco teórico.....	13
Modelo de Light Hill-Whitham-Richards (LWR).....	14
Modelo de Nel son	16
Metodología.....	17
Tipo de investigación	17
Diseño Muestral	18
Población.....	18
Muestra	18
Fases de la investigación	19
Capitulo 3 Resultados.....	19
Datos estadísticos.....	21

Media	21
Mediana	21
Desviación media	21
Varianza.....	21
Desviación típica	22
Coeficiente de variación	22
Factores de equivalencia para los diferentes tipos de vehículos	27
Intersección entre calle 16 sur y AV 9 Pte.	28
Intersección entre calle 8 sur y AV 9 Pte.	29
Intersección entre calle AV Juárez y AV 9 Pte.	30
intersección entre calle 7 sur y AV 9 Pte.	31
Diagramas de Flujo vehicular.....	32
Sincronización de los semáforos.....	36
Cálculo de fases.....	36
Fase 1	36
Fase 2	37
Flujo de saturación.....	37
Factor por ancho de carril.....	37
Factor de porcentaje de vehículos pesados.....	38
Factor por gradiente en el acceso.....	38
Factor por existencia de carriles de estacionamientos adyacentes al grupo de carriles	38
Factor por bloqueo de microbús que paran en el área de la intersección.....	38
Factor por el tipo de área	39
Factor por utilización de carriles.....	39
Factor por vueltas a la izquierda.....	39
Factor de vueltas a la derecha	39
Factor por peatones y ciclistas para vueltas a la izquierda y derecha.....	40
Flujo de saturación para avenida 9 Pte. y calle 16 sur.....	40
Cálculos de tiempos de ciclo optimo.....	41
Cálculo de ciclos de los semáforos.....	42
Cálculo de tiempo verde	43

Sincronización de los semáforos.....	44
Diagrama de fases y tiempos.....	46
Resultados de simulación.....	47
Conclusiones.....	48
Bibliografías.....	49

Capítulo 1 Definición del problema

Introducción

El tráfico vehicular es un problema que se presenta en todo el mundo y es uno de los de mayor crecimiento, ya que numerosos vehículos son utilizados diariamente para cubrir la necesidad del desplazamiento de las personas que habitan en las diferentes ciudades. En la actualidad el número de automóviles ha crecido ampliamente, por la demanda de la sociedad provocando el tráfico vehicular y contaminación al medio ambiente. También hay que tener en cuenta que más allá de las lesiones y las muertes por accidentes de tráfico, los coches son una fuente directa y principal de contaminación. Una mala calidad del aire afecta no solo a nuestro sistema respiratorio, sino también a nuestras funciones cardiovasculares, neurológicas e incluso reproductivas.

Si nos enfocamos en el análisis de los elementos de flujo vehicular se pueden entender las características y el comportamiento del tránsito, requisitos básicos para el planteamiento, proyecto y operación de carreteras, calles y sus obras complementarias dentro del sistema de transporte, esto es importante para poder determinar un buen flujo vehicular.

Con la aplicación de las leyes de la física y las matemáticas, el análisis del flujo vehicular describe la forma como circulan los vehículos en cualquier tipo de vialidad, lo cual permite determinar el Nivel de eficiencia de la operación.

Uno de los resultados más útiles del análisis del flujo vehicular es el desarrollo de los modelos microscópicos y macroscópicos que relacionan sus diferentes variables como el volumen, la velocidad, la densidad, el intervalo y el espaciamiento. Estos modelos han sido la base del desarrollo del concepto de Capacidad y Niveles de Servicio aplicado a diferentes tipos de elementos viales.

El objetivo, al abordar el análisis del flujo vehicular, es dar a conocer algunas de las metodologías e investigaciones y sus aplicaciones más relevantes en este tema, con particular énfasis en los aspectos que relacionan las variables del flujo vehicular, la descripción probabilística o casual del flujo de tránsito, la distribución de los vehículos en una vialidad y las distribuciones estadísticas empleadas en proyecto y control de tránsito.

Descripción del problema

El problema abordado trata de la congestión vehicular y su contaminación cuando empieza el ciclo de combustión del motor (que es cuando el motor contamina más), debido a que cuando el automóvil frena ya sea por algún semáforo o el auto este a la espera para avanzar por el volumen de automóviles que se encuentren transitando. A medida que aumenta el tránsito, se reducen cada vez más fuertemente las velocidades de circulación.

La demanda por el transporte es variable se produce congestión en diversos lugares, con negativas secuelas de contaminación.

Hay que tener en cuenta que algunos vehículos generan más congestión que otros, eso depende del número de personas que puede transportar el vehículo. El excesivo número de vehículos de transporte público contribuye a agravar la congestión.

Contaminación vehicular

vehículos de automotores son la principal fuente de contaminación de atmosférica. Donde existen semáforos se concentra una mayor contaminación debido a las sustancias toxicas que emiten los vehículos, el problema radica cuando los vehículos arrancan y aceleran, donde la acumulación de dióxido de carbono es mayor.

El CO₂ es liberado a la atmosfera por el consumo de la energía que proviene de todo tipo de actividades económicas, incluidos el transporte, el sector agropecuario, el comercio, el consumo del sector público y el doméstico. (7)

De acuerdo al inventario preliminar de emisiones de CO₂, los automóviles constituyen la principal fuente de contaminación atmosférica debido a que no se asegura o se genera una buena combustión interna en los motores, objeto que ocasiona una pérdida de potencia en el torque y un menor rendimiento de combustible. (8)

Objetivo general

Plantear a través de esta investigación un modelo que permita describir y mejorar el tránsito vehicular en la región de Tecamachalco Puebla. Para mejorar las condiciones del flujo vehicular.

Objetivos particulares

- Estudiar los modelos de flujo vehicular que existen actualmente para contribuir nuevas aportaciones.
- Estudiar algún modelo macroscópico para mejorar el flujo vehicular.
- Analizar el uso de energía de los vehículos durante el ciclo de conducción.

Justificación

El uso de un vehículo para transportarse ya es una necesidad en la actualidad, afectando el flujo vehicular debido a la gran cantidad de vehículos que existen. Tomando en cuenta la infraestructura vial de transporte, es necesario realizar modelos que permitan mejorar el congestionamiento vehicular. Para eso surge la necesidad de desarrollar nuevas investigaciones y aportaciones actualizadas específicas para para afrontar el problema de flujo de tráfico vehicular.

CAPITULO 2 Descripciones

Este capítulo abordara las definiciones de conceptos que son necesarios para tener una mejor comprensión del tema que se va a abordar. Para tener presente el contexto y tener una buena interpretación en el área de flujo vehicular.

Definición de simulación

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con él para entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias (dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o por un conjunto de criterios) para la operación del sistema (Shannon [1]).

Definición de modelo

Los modelos pueden desempeñar dos funciones representativas fundamentalmente diferentes. Por un lado, un modelo puede ser una representación de una parte seleccionada del mundo, al cual llamamos sistema. Dependiendo de su naturaleza, los modelos pueden ser modelos de fenómenos o modelos de información. Por otro lado, pueden representar una teoría en el sentido que éste interprete las leyes y axiomas de la teoría. Estas dos nociones no son mutuamente excluyentes debido a que los modelos científicos.

Estos pueden ser representaciones en ambos sentidos al mismo tiempo [2].

Los modelos se construyen mediante la acción conjunta de una comunidad científica, que tiene a disposición de sus miembros herramientas poderosas para representar aspectos de la realidad [3].

Modelo macroscópico

El nivel macroscópico describe la posición o estado físico concreto de las partículas que integran un cuerpo pudiendo resumirse en una ecuación de estado que sólo incluye magnitudes extensivas (volumen, longitud, masa) y magnitudes intensivas promedio (presión, temperatura).

En general, los modelos sirven para la planificación, en este caso ayudan al diseño, el control y la gestión de tráfico a diferente escala.

El modelo macroscópico se usa principalmente para predecir las características de viaje y el uso de los servicios de transporte.

Uno de los primeros modelos macroscópicos básicos fue el modelo básico de Light Hill y Whitham, modelo (LWR), el cual fue publicado en 1945. En este modelo se describe que el flujo o velocidad depende de la densidad.

Modelo matemático

La modelización matemática o modelaje matemático es el proceso racional de elaborar modelos matemáticos para expresar fenómenos reales. [4].

Un modelo matemático es una construcción matemática abstracta y simplificada relacionada con una parte de la realidad y creada para un propósito particular. Así, por ejemplo, un gráfico, una función o una ecuación pueden ser modelos matemáticos de una situación específica. De esta forma en un modelo matemático se pueden utilizar símbolos como “x” y “y” para representar variables.

Modelo matemático y el flujo vehicular

Los modelos matemáticos ayudan a interpretar y por lo tanto a mejorar el flujo vehicular en casos críticos, donde se analizan el movimiento de personas en zonas peatonales y accesos a edificios o casas. Ayudando a determinar la circulación de vehículos y respuesta de conductores.

Los siguientes conceptos son básicos para determinar un correcto flujo vehicular.

Velocidad

La velocidad está definida por la distancia que recorre un vehículo en una unidad de tiempo, como lo muestra la Ecuación 1.1

$$v = \frac{d}{t}$$

Densidad

La densidad está definida por la masa y el volumen, es una magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Flujo

El flujo o tasa de flujo de fluidos está definida por el volumen de fluido que pasa por una superficie dada en un tiempo determinado.

$$q = \frac{N}{t}$$

Tráfico

La palabra “congestión oh tráfico” se utiliza frecuentemente en el contexto del tránsito vehicular, tanto por técnicos, como por los ciudadanos en general.

La información sobre tráfico debe comprender la determinación del tráfico actual (volúmenes, tasa de flujo, demanda, capacidad), en base a estudios de tráfico futuro utilizando pronósticos. En los proyectos viales,

cuando se trata de mejoramiento de carreteras existentes (rectificación de trazado, ensanchamiento, pavimentación, etc.) o de construcción de carreteras alternas entre puntos ya conectados por vías de comunicación, es relativamente fácil cuantificar el tráfico actual y pronosticar la demanda futura.

Cuando se trata de zonas menos desarrolladas o actualmente inexplotadas, la estimación del tráfico se hace difícil e incierta. Este caso se presenta con frecuencia en nuestro país, que cuenta con extensas regiones de su territorio total o parcialmente inexplotadas.

Al respecto conviene recordar que los proyectos de carreteras en zonas inexplotadas o muy poco desarrolladas no constituyen en general proyectos aislados, sino que están vinculados con otros proyectos principalmente de infraestructura, tendientes al aprovechamiento de recursos inexplotados en la zona, tales como proyectos de colonización, agropecuarios, regadío, energía hidroeléctrica o termoeléctrica, comercialización, etc.

Conjuntamente con la selección del vehículo de diseño, se debe tomar en cuenta la composición del tráfico que utiliza o utilizará la vía, obtenida sobre la base de conteos del tráfico o de proyecciones que consideren el desarrollo futuro de la zona tributaria de la carretera y la utilización que tendrá cada tramo del proyecto vial.

La demanda vehicular es generada por los vehículos que circulan y los que acceden de los lotes adyacentes a las calles según su densidad.

De edificación, La oferta vial es caracterizada por su capacidad con base en el número de carriles y las velocidades de desplazamiento.

Relación entre demanda vehicular y la oferta vial

La demanda vehicular es la cantidad de vehículos que requieren desplazarse por un determinado sistema vial u oferta vial. Se entiende que dentro de la demanda vehicular se encuentran aquellos vehículos que están circulando sobre el sistema vial, los que se encuentran en cola esperando circular (en el caso de existir problemas de congestión) y los que deciden tomar rutas alternas (para evitar la congestión, si existe).

Para observar si la operación vehicular se da en consideración de flujo estable o saturado, es necesario comparar estos elementos. Para tal efecto, ellos se deben expresar en las mismas unidades, por lo que la oferta vial, que representa el espacio físico (calles y carreteras), se puede indicar en términos de su sección transversal o capacidad.

De esta manera, la oferta vial o capacidad representa la cantidad máxima de vehículos que finalmente pueden desplazar o circular en dicho espacio físico.

Factores que intervienen en el problema de tránsito

Las ciudades dependen grandemente de sus sistemas de calles, ofreciendo servicios de transporte. Muchas veces, estos sistemas tienen que operar por arriba de su capacidad, con el fin de satisfacer los incrementos de demanda por servicios de transporte, ya sea para tránsito de vehículos livianos, tránsito comercial, transporte público, acceso a las distintas propiedades o estacionamientos, etc., originando obviamente problemas de tránsito, cuya severidad por lo general se puede medir en términos de accidentes y congestiónamiento.

- a) Diferentes tipos de vehículos en la misma vialidad

- b) Superposición del tránsito motorizado en vialidades inadecuadas

- c) Falta de planificación en el tránsito

- d) El automóvil no considerado como una necesidad pública

- e) Falta de asimilación por parte del gobierno y del usuario

Marco teórico

El estudio del flujo vehicular tuvo sus primeras apariciones en los años 30 por Bruce Douglas Greenshields. Él fue el primero en aplicar los métodos fotográficos y matemáticos para definir las variables en el flujo vehicular (velocidad, densidad y flujo) y tratar de explicar su comportamiento.

En este caso el flujo de vehículos en la carretera se concibe como el flujo compresible de un fluido descrito por variables macroscópicas asociadas al comportamiento colectivo del sistema.

El modelo macroscópico especifica el flujo del tránsito de una manera análoga, en comparación a los líquidos y gases. Por ello se les puede llegar a conocer como modelos hidrodinámicos. [5]

Este modelo presenta ciertas ventajas:

- Se considera el flujo en varios carriles
- Se incluye con facilidad la variable de entradas y salidas

Este modelo describe el comportamiento de una serie de características, está afectado por la casualidad o la aleatoriedad (fenómenos colectivos).

Bruce Douglas Greenshields descifro la velocidad promedio en base a la densidad promedio.

$$Ve(\rho) = Vmax(1 - \rho/\rho_{max})$$

El valor de p_{max} (densidad máxima) es aproximadamente de 140[V eh/Km] y V_{max} [Km/Hr] está definido por el límite de velocidad de cada autopista. Para la relación flujo densidad se tiene en cuenta que el flujo está definido por: $Q = \rho V$

Sustituyendo al flujo en la velocidad promedio:

$$Q(\rho) = V_{max}\rho(1 - \rho/\rho_{max})$$

Esta relación, flujo-densidad, se le conoce como relación fundamental de Greenshields.

El flujo es cero siempre y cuando la densidad sea $\rho = 0$ o $\rho = \rho_{max}$.

Modelos de primer orden

Modelo de Light Hill-Whitham-Richards (LWR)

Este es un modelo macroscópico que surgió en 1955 donde se considera que ningún automóvil entra o sale de la carretera (aquí solo se considera una variable).

Si se combina el modelo de Greenshields y la ecuación de continuidad se obtiene:

$$\frac{dp}{dt} + \frac{dq(p)}{dx} = 0$$

Su modelo está basado en un escenario donde la cantidad de autos en un circuito homogéneo se conserva. [6]

Light Hill y Whitham cierran el sistema proponiendo la relación fundamental de Greenshields, que aún se sigue utilizando para investigaciones analíticas [6].

Obteniendo la siguiente ecuación:

$$Q(x,t) = Qe(p(x,t)) = p(x,t) Ve(p(x,t))$$

$$Ve(p) = Vmax \left(1 - \frac{p}{pmax}\right)$$

Sustituyendo la ecuación de Greenshields y desarrollando la derivada:

$$\frac{dp}{dt} + \frac{dQe}{dP} \frac{dp}{dx}$$

Donde:

$$\frac{dQe}{dP} = \left(Ve(p) + p \frac{dVe}{dP} \right)$$

Aquí se consideran los siguientes valores

- $dVe/dp \leq 0$
- $dQe/dp \leq Ve(p)$

La formación de ondas de choque no es deseable debido a que no representan los datos.

Empíricos y consecuentemente no reflejan la realidad. Para evitar la formación de ondas de choque, Whitham (1974) sugirió en su modelo introducir un término difusivo [6].

Obteniendo:

$$D(p) = \frac{-\lambda p V'(p) - T p^2 [V'(p)]^2}{\dots} \quad \frac{dp}{dt} = \left(V_e(p) + p \frac{dV_e}{dp} \right) \frac{dp}{dx} = \frac{dp}{dx} \left(D \frac{dp}{dx} \right)$$

Modelo de Nelson

Este modelo toma como referencia el modelo de LWD, pero describe mejor el flujo sincronizado por medio del coeficiente de difusión. El cual se describe como la transición entre dos sistemas que son: el flujo libre y el flujo congestionado.

El coeficiente de difusión que utilizo Nelson es dependiente de la densidad, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$V(x, t) = V_e(p(x + \lambda - VT, t - T))$$

Dónde:

T: tiempo de reacción de los conductores donde tratan de ajustar la velocidad en cualquier posición con respecto al tiempo (t).

T: tiempo de retraso de respuesta.

Para compensar dicho retraso se ajusta la densidad a una cierta distancia (x).

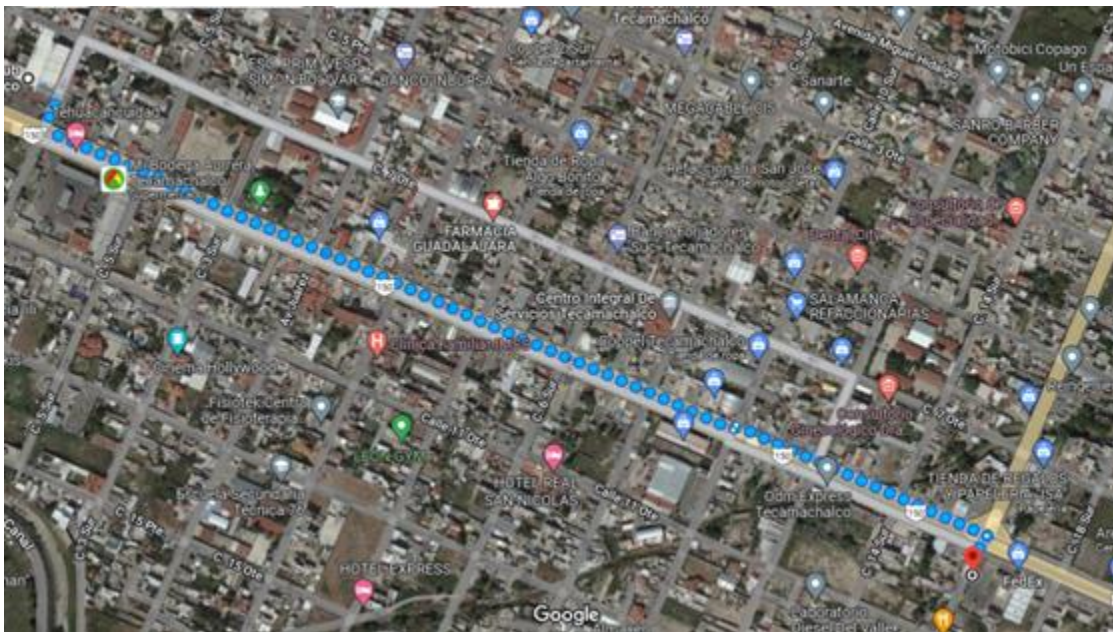
De tal manera que el coeficiente de difusión queda de la siguiente manera:

$$D(p) = \frac{-\lambda p V'(p) - T p^2 [V'(p)]^2}{\dots}$$

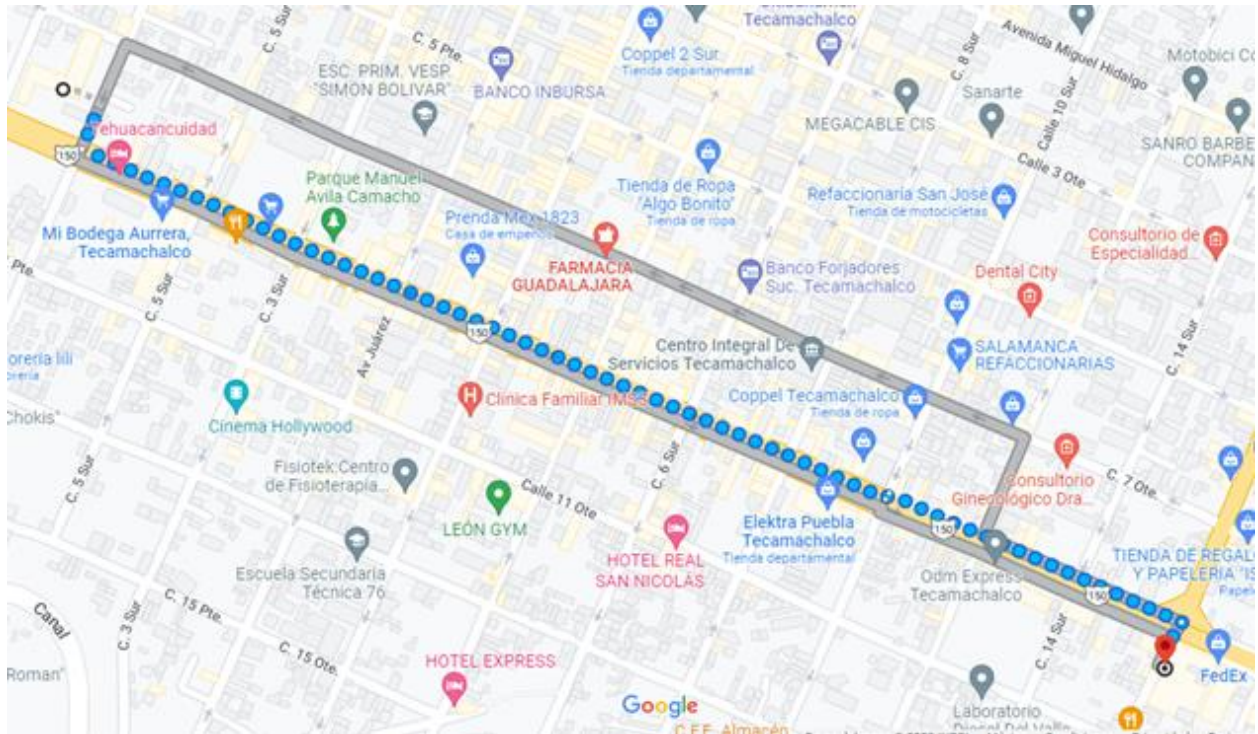
Metodología

Tipo de investigación

En esta investigación se realizó un sondeo para la recolección de datos en campo, delimitándose a una zona de estudio, la cual es la avenida 9 poniente, empezando en el tramo de la calle 7 sur a 16 sur, dicha información recolectada servirá para describir mejor el problema de congestión vehicular, ya que esta zona es la más afectada por el tráfico en la ciudad de Tecamachalco.



Mapa satelital de: Avenida 9 poniente en la ciudad de Tecamachalco, tramo de 7 a 16 sur.



Mapa de: Avenida 9 poniente en la ciudad de Tecamachalco, tramo de 7 a 16 sur.

Diseño Muestral

Población

La población a estudiar para esta tesis se basa en el conjunto de personas y vehículos que transitan por la calle: avenida 9 poniente de la calle 29 sur y 16 sur. Dicha población se analizará por medio de muestras en campo (levantamientos).

Muestra: Es la interpretación de un conjunto de individuos o datos que se toman de la población, los cuales serán analizados para la interpretación del flujo vehicular.

Fases de la investigación

- Características de la vía
- Cantidad de vehículos
- Velocidades en la vía
- Volúmenes de vehículos
- Ciclo semafórico
- Análisis de los resultados
- Propuesta para mejorar la congestión vehicular

Recolección de la información

La información que se recolectara a través de observación controlada, para observar los volúmenes de los vehículos, ciclos semafóricos y lugares designados para los peatones.

Capítulo 3 Resultados

Para obtener los resultados se hizo una visita de campo a avenida 9 poniente en la ciudad de Tecamachalco, tramo de 7 sur a 16 sur.

Esta carretera tiene dos sentidos, el primer sentido es norte Tecamachalco-puebla y el otro es sentido sur Tecamachalco-Tehuacán.

En la visita de campo se dio a la tarea de contar los diferentes tipos de vehículos en cada determinada hora, los resultados se muestran a continuación en la siguiente tabla.

Hora	Motocicleta	Autos	Transporte publico	Camiones	Total:
07:00	1	4	3	3	11
07:30	2	4	5	1	12
08:00	2	3	2	3	10
08:30	1	6	3	2	12
09:00	2	8	5	2	17
09:30	3	4	5	1	13
10:00	3	4	5	2	14
10:30	2	6	3	1	12
11:00	1	3	5	2	11
11:30	3	3	5	3	14
12:00	1	4	3	2	10
12:30	2	6	4	2	14
13:00	3	7	5	1	16
13:30	3	8	3	2	16
14:00	1	5	3	2	11
14:30	3	8	4	2	17
15:00	3	3	4	3	13
15:30	3	3	5	3	14
16:00	2	3	2	2	9
16:30	2	8	5	3	18
17:00	3	3	2	2	10
17:30	1	7	2	3	13
18:00	1	6	3	3	13
18:30	2	5	4	3	14
19:00	1	3	2	2	8
19:30	3	7	3	3	16
20:00	1	5	3	3	12
20:30	1	5	5	3	14
21:00	1	7	5	2	15
21:30	2	3	2	3	10
22:00	2	6	4	1	13

Tabla 1.1 Flujo de vehículos por minuto en avenida 9 pte en ambos sentidos.

Datos estadísticos

Los datos estadísticos nos permitirán tener un mejor análisis para poder interpretar los datos y tomar mejores decisiones en base al flujo vehicular.

Media

La media se encuentra a partir de la suma de todos los valores totales de los vehículos y se dividen sobre el número total de valores que se obtuvieron.

$$Media = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$$

$$Media = \frac{402}{31} = 12.967$$

Mediana

La mediana se obtiene a partir de organizar los totales de menor a mayor. Una vez conociendo la cantidad de datos se toma el valor central.

$$Mediana = 13$$

Desviación media

Para calcular la desviación media, se toman todos los valores y se les resta la media, después se suma cada resultado y se divide entre el número total de valores.

$$Dm = \frac{(x_1 - X) + (x_2 - X) + (x_3 - X) + \dots + (x_n - X)}{n}$$

$$Dm = 8.59 \times 10^{-13}$$

Este resultado se eleva al cuadrado, sumando cada uno de estos resultados, dividiéndolos entre el número total de valores.

$$V = \frac{(x_1 - x_2)^2 + (x_2 - x)^2 + (x_n - x)^2}{n}$$

$$V = 6.031$$

Desviación típica

El valor se obtiene de la raíz cuadrada de la varianza.

$$V = \sqrt{\frac{(x_1 - x_2)^2 + (x_2 - x)^2 + (x_n - x)^2}{n}}$$

$$Dt = 2.456$$

Coefficiente de variación

Se obtiene del valor de la desviación típica y se divide sobre la media. Para obtener el valor porcentual se multiplica por 100.

$$Co = \frac{Dt}{X} * 100$$

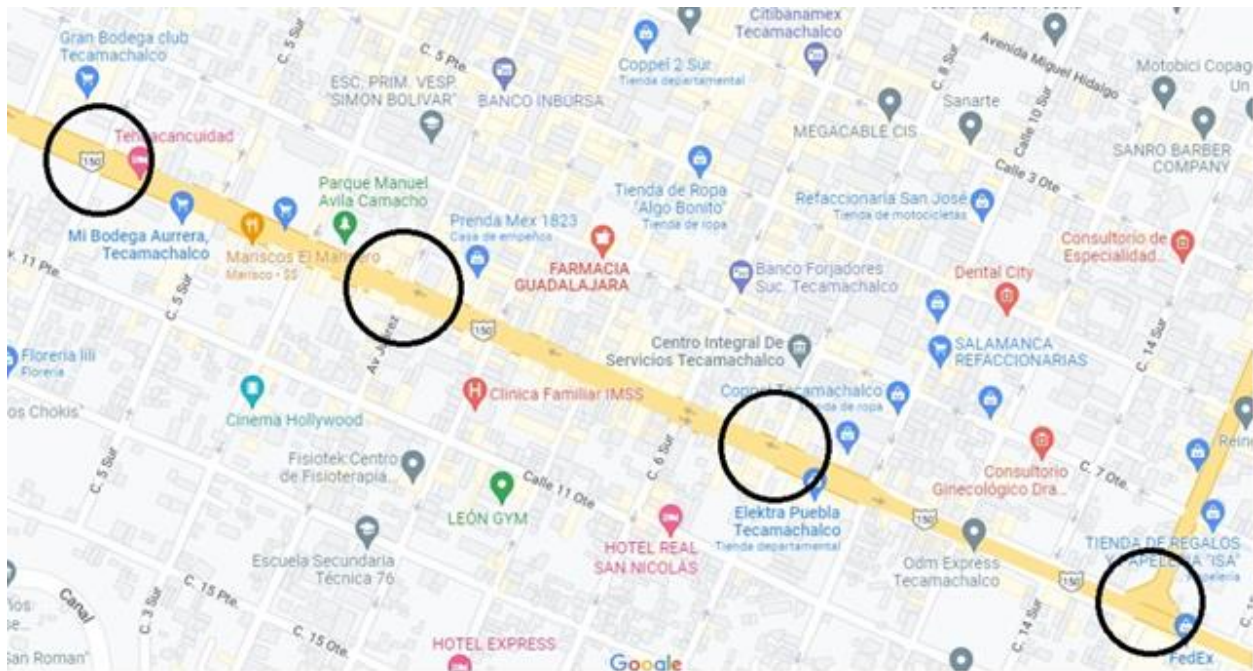
$$Co = 18.95$$

Simulador

El modelo de flujo vehicular macroscópico nos ayuda a tener una mejor perspectiva que se asemeja mejor a la realidad. Durante esta tesis nos estaremos basando en la teoría de las colas, ya que las calles se consideran como colas las cuales tienen una determinada longitud de auto más la longitud de separación entre los autos.

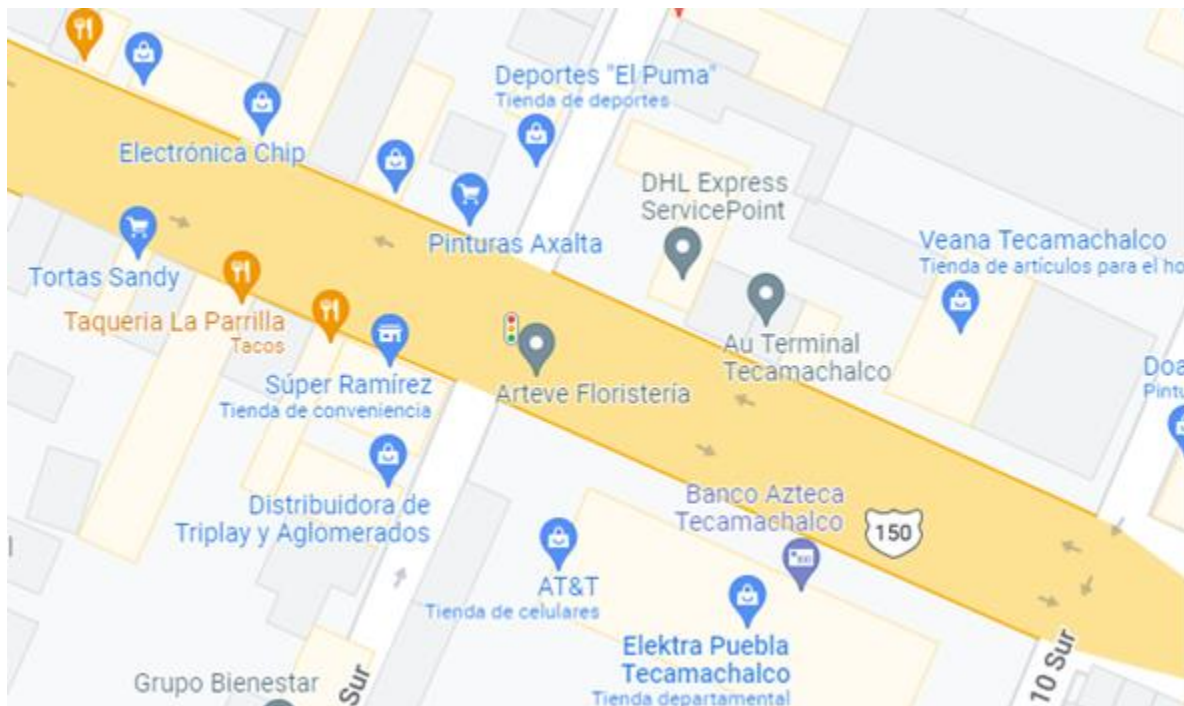
La longitud de la teoría de colas dependerá del número de autos que ingresen a la calle.

A continuación se muestran las intersecciones principales en las cuales se encuentran los semáforos que se van a mejorar la sincronización.





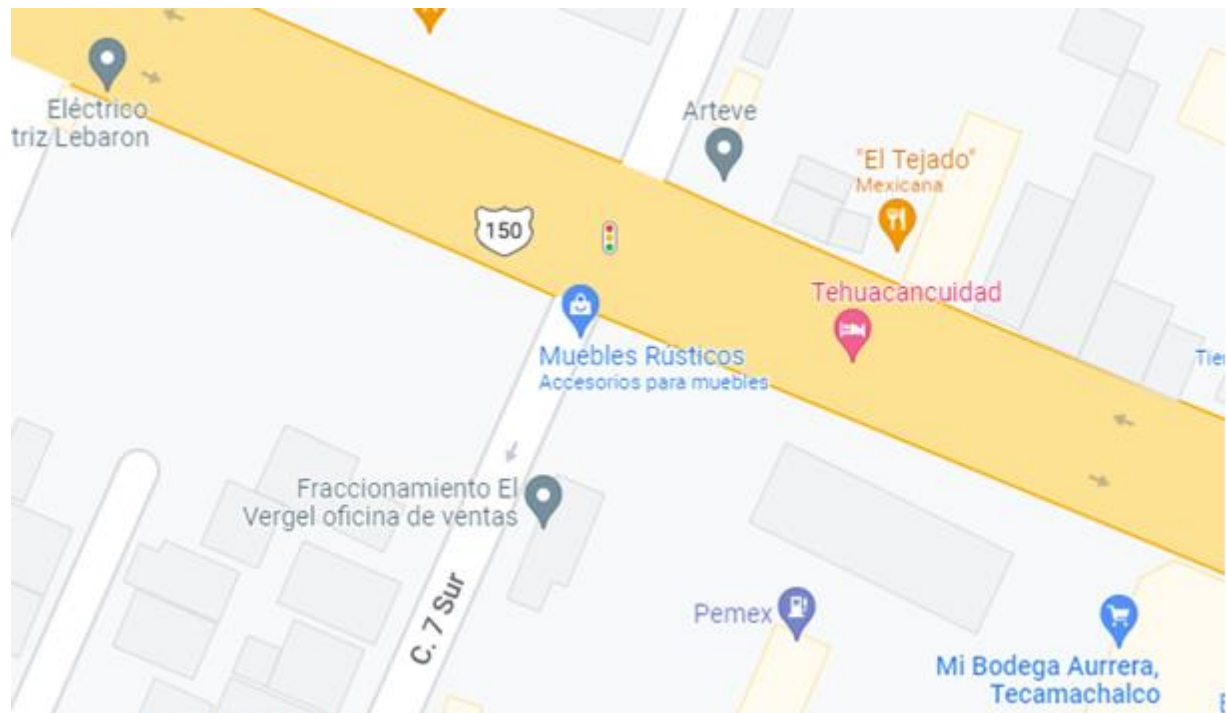
Intersección entre calle 16 sur y AV 9 Pte.



Intersección entre calle 8 sur y AV 9 Pte.



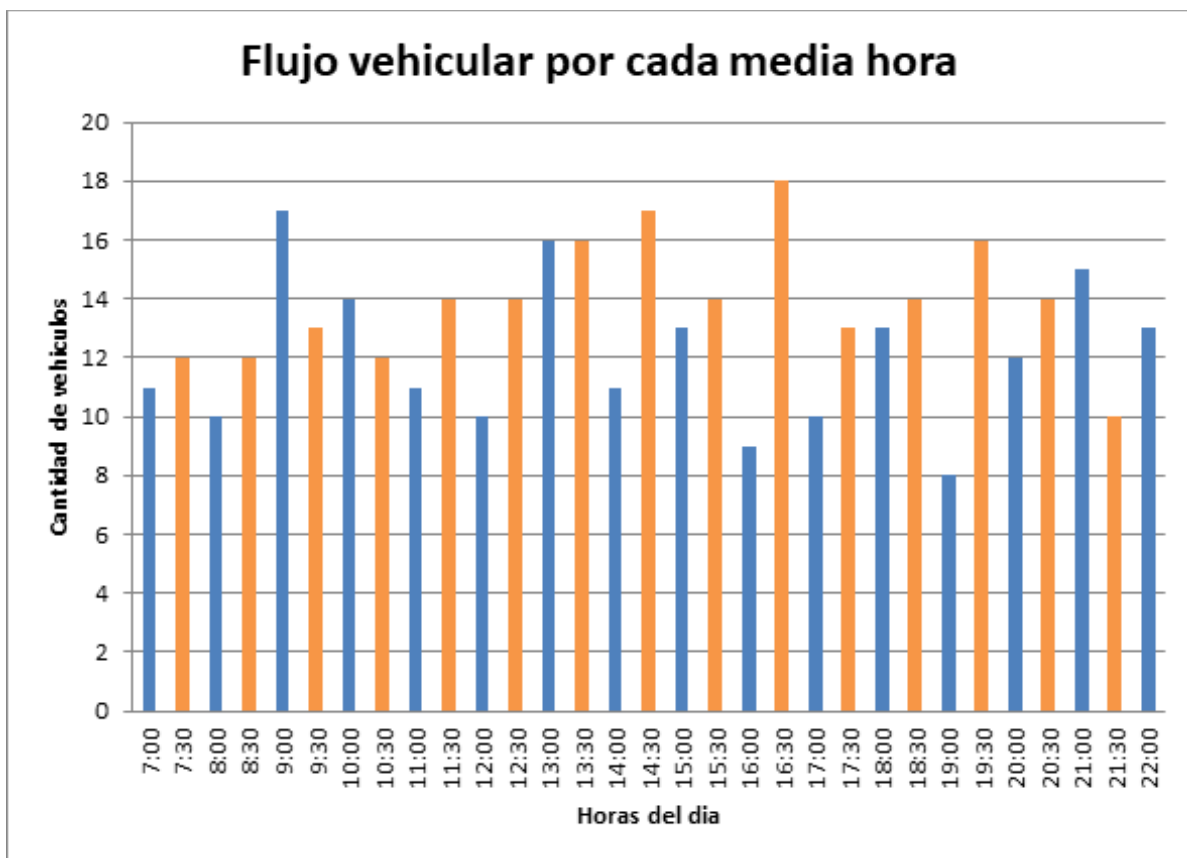
Intersección entre AV Juárez y AV 9 Pte.



Intersección entre calle 7 sur y AV 9 Pte.

Uno de los propósitos de esta investigación es obtener una buena sincronización de semáforos. Dicha sincronización se va a realizar por medio de los datos que se obtuvieron anteriormente. Así podremos observar el comportamiento de los semáforos en los cruces de las calles.

En base a los resultados obtenidos se muestran gráficas del flujo de vehículos a cada media hora del día.



Grafica 1.1 Flujo promedio vehicular por min en AV. 9 PTE ambos sentidos.

Factores de equivalencia para los diferentes tipos de vehículos

Tipo de vehículo	Factor de equivalencia
Moto lineal	0.25
Auto	1
Microbús	2
Camión 2E + 3E	3

Los factores de equivalencia que se muestran en la tabla 2.1 son los utilizados para este trabajo en las intersecciones que estudiaremos.

A continuación se muestra una tabla con las intersecciones de estudio donde se mostrará el promedio de la cantidad de vehículos que circulan en cada intersección.

En base a la gráfica 1.1 se muestran 3 tablas en base a los horarios donde hay mayor flujo vehicular en el cual se muestran los horarios 9:00 am, 14:30 pm y 16:30 pm. Estos valores se obtuvieron a partir de una visita de campo.

Intersección entre calle 16 sur y AV 9 Pte.

Horario 9:00 am	
Intersección calle 16 sur y Av. 9 pte	
Tipo de vehículo	N°
Moto lineal	2
Auto	7
Microbús	4
Camión 2E + 3E	3

Horario 14:30 pm	
Intersección calle 16 sur y Av. 9 pte	
Tipo de vehículo	N°
Moto lineal	2
Auto	7
Microbús	5
Camión 2E + 3E	2

Horario 16:30 pm	
Intersección calle 16 sur y Av. 9 pte	
Tipo de vehículo	N°
Moto lineal	3
Auto	8
Microbús	4
Camión 2E + 3E	3

Intersección entre calle 8 sur y AV 9 Pte.

Horario 9:00 am	
Intersección calle 8 sur y Av. 9 pte	
Tipo de vehículo	N°
Moto lineal	2
Auto	6
Microbús	4
Camión 2E + 3E	3

Horario 14:30 pm	
Intersección calle 8 sur y Av. 9 pte	
Tipo de vehículo	N°
Moto lineal	2
Auto	5
Microbús	5
Camión 2E + 3E	3

Horario 16:30 pm	
Intersección calle 8 sur y Av. 9 pte	
Tipo de vehículo	N°
Moto lineal	3
Auto	7
Microbús	5
Camión 2E + 3E	3

Intersección entre calle AV Juárez y AV 9 Pte.

Horario 9:00 am	
Intersección AV. juarez y Av. 9 pte	
Tipo de vehículo	N°
Moto lineal	2
Auto	9
Microbús	4
Camión 2E + 3E	1

Horario 14:30 pm	
Intersección AV. juarez y Av. 9 pte	
Tipo de vehículo	N°
Moto lineal	2
Auto	8
Microbús	4
Camión 2E + 3E	1

Horario 16:30 pm	
Intersección AV. juarez y Av. 9 pte	
Tipo de vehículo	N°
Moto lineal	3
Auto	9
Microbús	5
Camión 2E + 3E	2

intersección entre calle 7 sur y AV 9 Pte.

Horario 9:00 am	
Intersección calle 7 sur y Av. 9 pte	
Tipo de vehículo	N°
Moto lineal	3
Auto	6
Microbús	5
Camión 2E + 3E	2

Horario 14:30 pm	
Intersección calle 7 sur y Av. 9 pte	
Tipo de vehículo	N°
Moto lineal	3
Auto	5
Microbús	3
Camión 2E + 3E	2

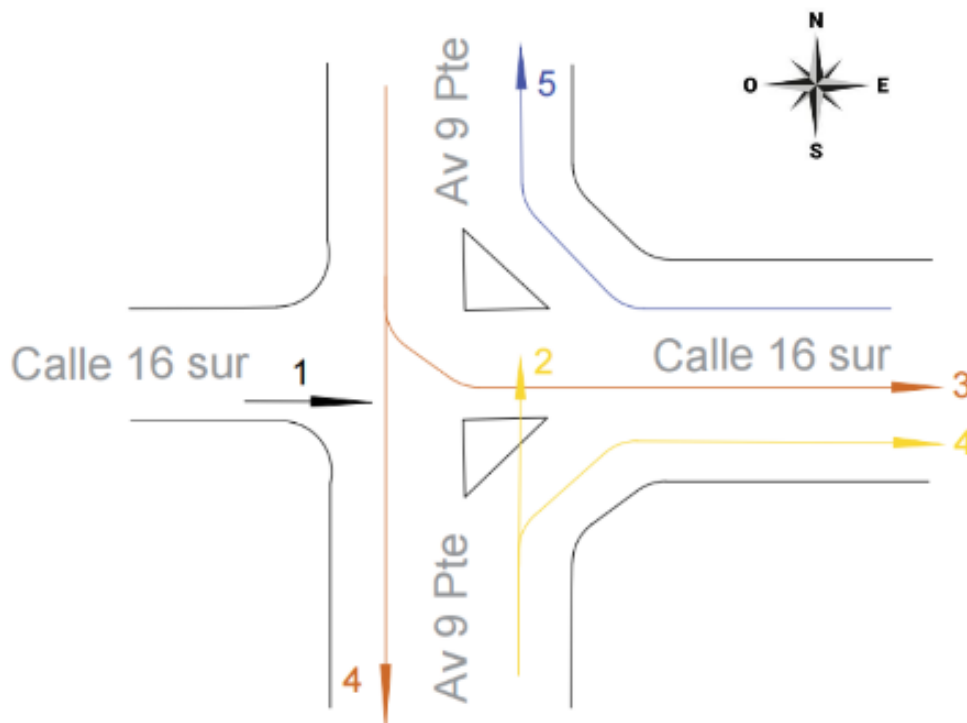
Horario 16:30 pm	
Intersección calle 7 sur y Av. 9 pte	
Tipo de vehículo	N°
Moto lineal	3
Auto	7
Microbús	4
Camión 2E + 3E	2

Diagramas de flujo vehicular

Para obtener los valores de los diagramas de flujo vehicular, se obtuvieron a partir del promedio de los valores de visita de campo tomando en cuenta el horario y la intersección correspondiente.

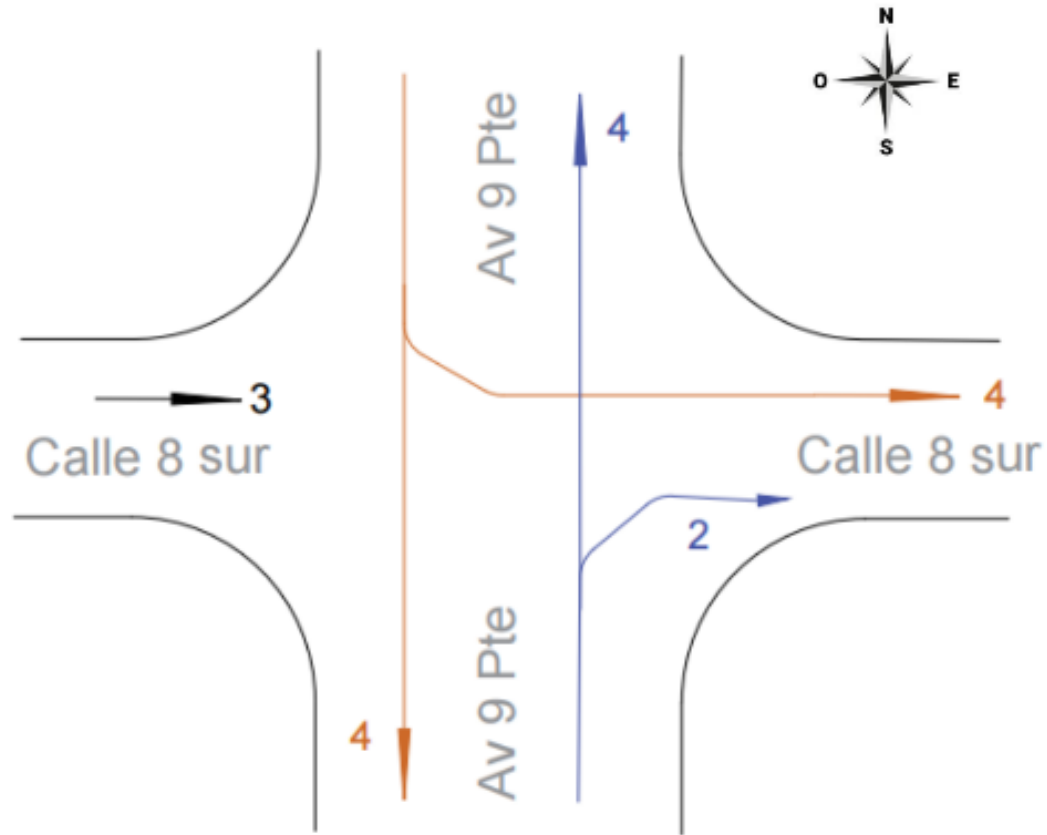
Cuando se obtiene el promedio hay valores con decimales, los cuales el valor que se tomará en cuenta para el diagrama será el valor absoluto superior.

Diagrama de flujo vehicular intersección Av. 9 PTE y calle 16 sur



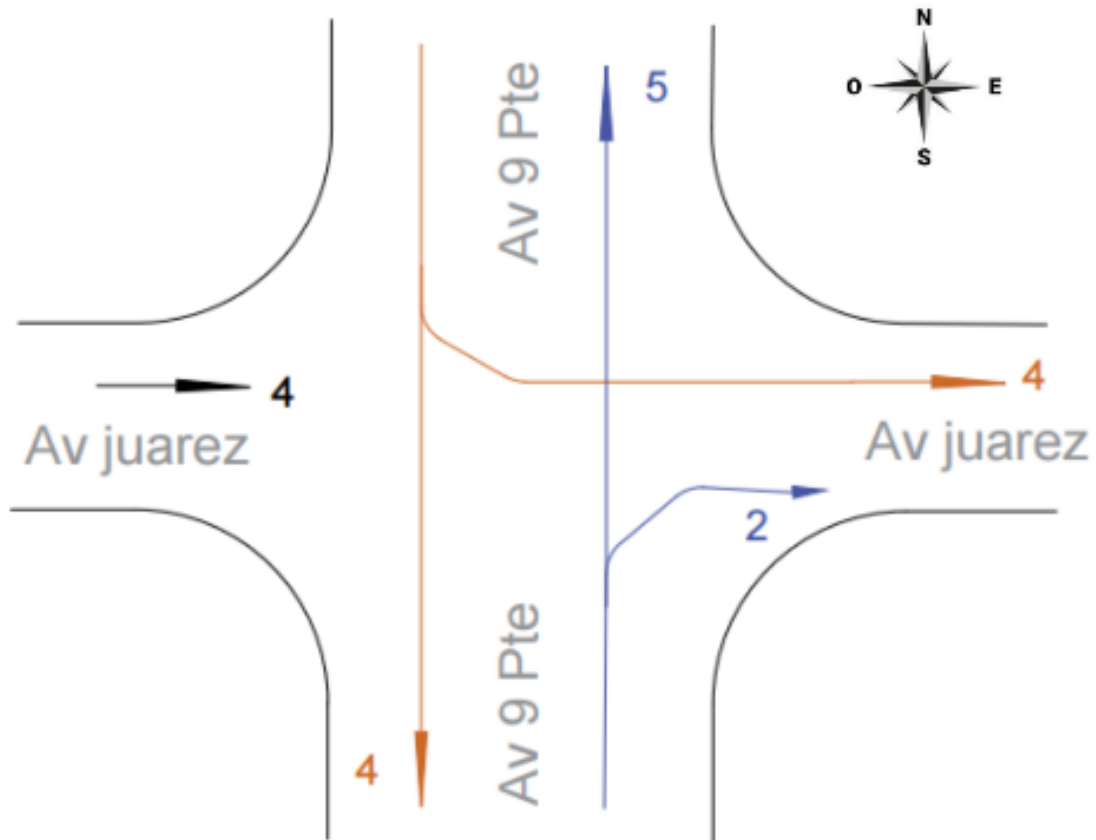
Tipo de Vehículo	Norte ↑	Sur ↓	Este →	Oeste ←	Total
Moto lineal	1		1		2
Auto	3	2	3		8
Microbús	2	1	2		5
Camión 2E+3E	1	1	2		4
				Total	19

Diagrama de flujo vehicular intersección Av. 9 PTE y calle 8 sur



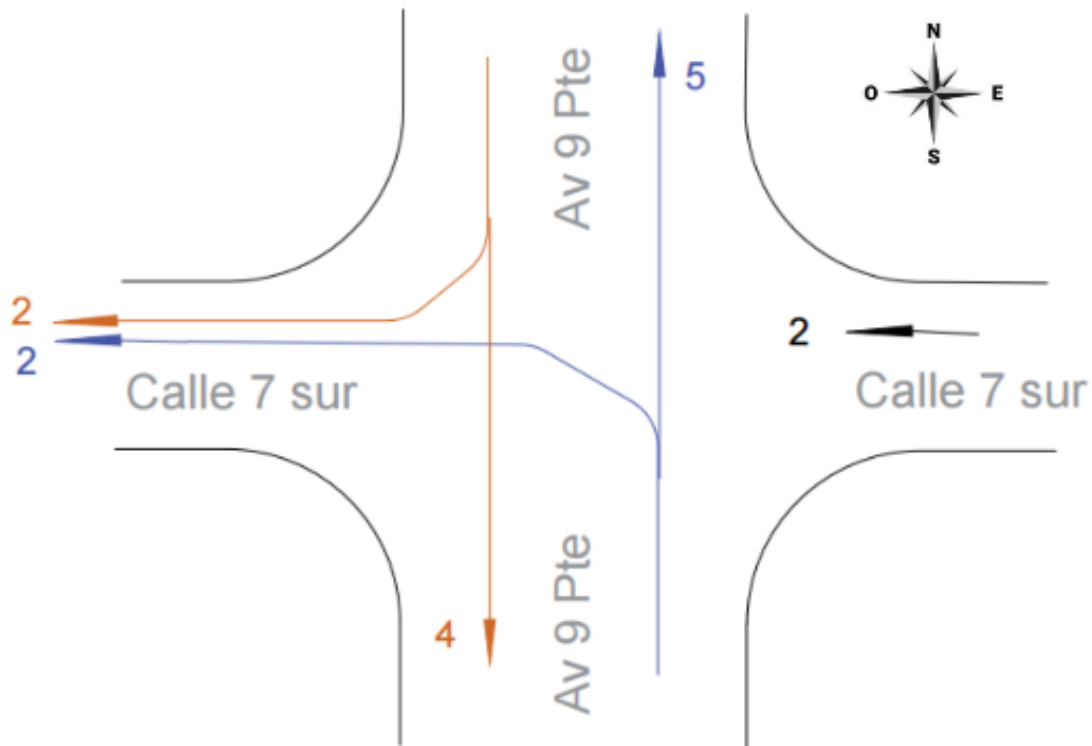
Tipo de Vehículo	Norte ↑	Sur ↓	Este →	Oeste ←	Total
Moto lineal	1		1		2
Auto	1	2	6		9
Microbús	1	1	2		4
Camión 2E+3E	1	1			2
				Total	17

Diagrama de flujo vehicular intersección Av. 9 Pte. y Av. Juárez.



Tipo de Vehículo	Norte ↑	Sur ↓	Este →	Oeste ←	Total
Moto lineal	1	1	1		3
Auto	2	1	6		9
Microbús	1	1	3		5
Camión 2E+3E	1	1			2
				Total	19

Diagrama de flujo vehicular intersección Av. 9 Pte. y calle 7 sur



Tipo de Vehículo	Norte ↑	Sur ↓	Este →	Oeste ←	Total
Moto lineal	1	1		1	3
Auto	2	1		2	5
Microbús	1	1		2	4
Camión 2E+3E	1	1		1	3
				Total	15

Sincronización de los semáforos

Se cuenta con 4 semáforos que se presentan de manera consecutiva en la avenida 9 poniente y las intersecciones antes mencionadas, el objetivo es una buena sincronización de los semáforos, de tal forma que haya un flujo de vehículos constante.

Para lograr un flujo de vehículos constante nos basaremos en las ecuaciones de **Webster** y **cobbe**, que nos ayudaran con el flujo y las intersecciones de los vehículos.

El tiempo de desfase corresponde al tiempo que se hace un automóvil en recorrer la distancia entre los semáforos.

Para calcular un buen ciclo óptimo tomaremos en cuenta los valores de los flujos de automóviles directos. (ADE).

Cálculo de fases

La vía de estudio consta de 2 direcciones norte-sur y sur-norte y giro en las calles transversales. El tipo de semáforo que esta implementado es el de 2 fases.

Fase 1

Que se permita el paso en la avenida 9 poniente en ambas direcciones (norte – sur y sur – norte). Durante el intervalo verde se podrá girar a la derecha o izquierda según sea la dirección de la calle, debido a que cada intersección tiene una dirección determinada.

Fase 2

Se permitirá el paso en las intersecciones (calle 16 sur, 8sur, av. Juárez y calle 7 sur). Durante el intervalo rojo se detendrá el flujo vehicular en la av. 9 Pte. para permitir el flujo en las intersecciones antes mencionadas.

Flujo de saturación

Los valores de intervalo de cambio de fase y longitud del ciclo se calcularán con la velocidad de $V=30$ km/h que es la velocidad permitida en la av. 9 poniente.

Se tomarán los valores donde exista un mayor flujo de vehículos para ser lo más realista posible.

Para obtener el flujo de saturación entre avenida 9 Pte. y calle 16 sur se va a partir de la hipótesis de que el flujo de saturación en condiciones ideales es $S_0=1200$ hora de luz verde por carril.

Factor por ancho de carril

Nº de carriles $N=2$

El ancho total de la avenida 9 Pte. es de 7 m, por lo tanto, cada carril tiene 3.5 m de ancho. ($W=3.5m$).

$$f_w = 1 + \frac{W - 3.6}{9}$$
$$f_w = 1 + \frac{3.5 - 3.6}{9} = 0.988$$

Factor de porcentaje de vehículos pesados

El porcentaje de vehículos pesados en el tramo es 0.47%

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + \%HV(ET - 1)}$$

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + 0.47(4 - 1)} = 0.986$$

Factor por gradiente en el acceso

La gradiente en av. 9 Pte. es 0.5%

$$f = 1 - \frac{G\%}{200}$$

$$f = 1 - \frac{0.5}{200} = 0.997$$

Factor por existencia de carriles de estacionamientos adyacentes al grupo de carriles

Como no existen estacionamiento en av. 9 Pte.

$$f_p = 1$$

Factor por bloqueo de microbús que paran en el área de la intersección

El número de microbuses que pasan en ese tramo es 7microbuses/hora.

$$f_{bb} = \frac{N - \frac{14.4Nb}{3600}}{N} \quad f_{bb} = \frac{7 - \frac{14.4 \cdot 7}{3600}}{7} = 0.996$$

Factor por el tipo de área

Como la avenida 9 poniente se encuentra en la zona centro de la ciudad de Tecamachalco, se considera:

$$f_a = 0.900$$

Factor por utilización de carriles

Tomando en cuenta el valor de autos que pasan por la calle por hora y el número de carriles.

$$f_{LU} = \frac{V_g}{V_g * N}$$

$$f_{LU} = \frac{360 + 300}{360 * 2} = 0.916$$

Factor por vueltas a la izquierda

$$f_{LT} = 1 - 0.15 * PLT$$

$$f_{LT} = 1 - 0.15 * \frac{360}{360 + 300} = 0.918$$

Factor de vueltas a la derecha

$$f_{RT} = 1 - 0.15 * PLt$$

$$f_{RT} = 1 - 0.15 * \frac{300}{360 + 300} = 0.931$$

Factor por peatones y ciclistas para vueltas a la izquierda y derecha

El factor por peatones se toma 1 ($fLpb=1.0$) porque existe el paso.

El factor por bicicletas se toma 1 ($fRpb=1$) ya que no existe control.

Flujo de saturación para avenida 9 Pte. y calle 16 sur

$$S_i = S_o(N)(f_w)(f_{HV})(f_g)(f_p)(f_{bb})(f_a)(f_{LU})(f_{LT})(f_{RT})(f_{Lpb})(f_{Rpb})$$

Sustituyendo los valores

$$S_i = 1200 * 2 * 0.988 * 0.986 * 0.997 * 1 * 0.996 * 0.900 * 0.916 * 0.918 * 0.931 * 1 * 1$$

$$S_i = 1635.799 \text{ vehículos equivalentes/hora de luz verde}$$

Flujos de saturación para AV. 9 Pte. sentido Puebla- Tehuacán.

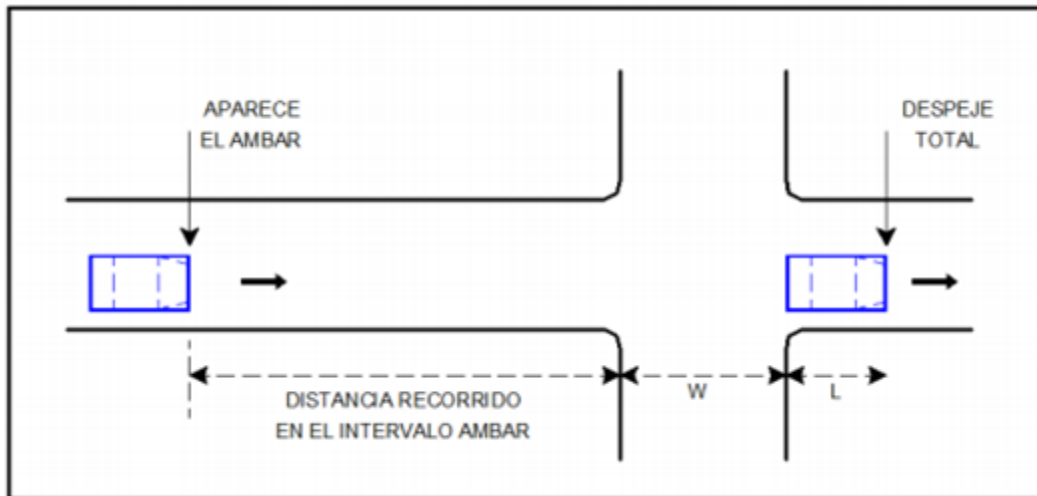
		fw	fHV	fg	fp	fb	fa	fLU	fLT	fRT	fLpb	fRpb	Flujo saturación ADE/hora
AV. 9 pte	Calle 16 sur	0.988	0.986	0.997	1	0.996	0.9	0.916	0.918	0.931	1	1	1635.799
	Calle 8 sur	0.956	0.934	0.927	1	0.912	0.899	0.756	0.912	0.934	1	1	1048.851
	AV. Juárez	0.935	0.976	0.943	1	0.982	0.977	0.654	0.923	0.954	1	1	1141.086
	Calle 7 sur	0.965	0.934	0.956	1	0.91	0.934	0.962	0.915	0.976	1	1	1510.002

Flujos de saturación en AV. 9 Pte. sentido Tehuacán-puebla.

		fw	fHV	fg	fp	fb	fa	fLU	fLT	fRT	fLpb	fRpb	Flujo saturación ADE/hora
AV. 9 pte	Calle 16 sur	1.088	1.017	0.998	1	1.020	0.909	0.764	1	0.997	1	1	1871.734
	Calle 8 sur	1.010	0.978	0.998	1	0.967	0.909	0.956	1	0.951	1	1	1890.735
	AV. Juárez	0.988	1.030	0.998	1	1.010	0.909	0.783	1	0.973	1	1	1704.888
	Calle 7 sur	0.999	1.023	0.998	1	0.973	0.909	0.976	1	0.980	1	1	2070.787

Cálculo de tiempos de ciclo óptimo

El cambio de fase se expresa de la suma de los intervalos de ámbar y rojo de un ciclo.



Se utilizará la siguiente ecuación 1.1

$$y = \left(t + \frac{v}{2a} \right) + \left(\frac{w + L}{v} \right)$$

Dónde:

- Y= intervalo de cambio de fase, ámbar más rojo (s)
- T= tiempo de percepción-reacción del conductor (1s)
- V= velocidad de aproximación de los vehículos (m/s)
- A= tasa de desaceleración (3.05 m/s²)
- W= ancho de la intersección (m)
- L= longitud del vehículo (vehículo que predomina)

Para intersección de ave 9 Pte. y calle 16 sur

T= 1.00 s

a= 3.05 m/s²

w= 11.50 m

L= 4.50 m

Se muestran tres valores de velocidades 25 km/h, 30km/h y 35 km/h. Dichas velocidades son permitidas a lo largo de la Av. 9pte.

Cálculo de ciclos de los semáforos

Para calcular el tiempo de los ciclos de semáforo, se debe conocer el valor de “y” para conocer el flujo de saturación de los vehículos. Para obtener el valor de se sustituyen los valores en la ecuación 1.1. A continuación se muestra una tabla con los valores de “y” en cada intersección de la AV.9 Pte.

	AV 9 PTE Puebla - Tehuacán			AV 9 PTE Tehuacán-Puebla			
	Volumen maximo de vehiculos ADE	Flujo de saturación	YI	Volumen maximo de vehiculos ADE	Flujo de saturación	YI	YI Total
Calle 18 sur	587	1635.799	0.42	553	1871.734	0.43	0.85
Calle 8 sur	514	1048.851	0.30	506	1890.735	0.33	0.63
Av. Juarez	578	1141.086	0.37	562	1704.888	0.38	0.75
Calle 7 sur	456	1510.662	0.28	444	2070.787	0.41	0.69

Una vez obtenido el valor de “y total”, se calcula el tiempo de ciclo para cada intersección. La ecuación para calcular el ciclo óptimo se muestra a continuación.

$$C_o = \frac{1.5L + 5}{1 - Y_{total}}$$

Dónde:

Co: tiempo de ciclo optimo

L: suma de los tiempos perdidos (el tiempo perdido en todas las

fases es de 7 segundos.)

Y total: índice de saturación de flujo

A continuación, se muestra una tabla con los valores del ciclo óptimo.

	L (tiempo perdido en cada fase)	Y Total	Ciclo optimo	Ciclo optimo redondeado
Calle 16 sur	7.00	0.85	103.33	104
Calle 8 sur	7.00	0.63	41.89	42
AV. Juárez	7.00	0.75	62	62
Calle 7 sur	7.00	0.69	50	50

Como los valores del ciclo óptimo en cada intersección varían mucho, se tomará un promedio de todos los ciclos óptimos para usarlo en el cálculo del tiempo para el color verde de los semáforos.

		Ciclo optimo redondeado
Av 9 PTE.	Calle 16 sur	64
	Calle 8 sur	64
	AV. Juárez	64
	Calle 7 sur	64

Cálculo de tiempo verde

Para calcular el tiempo color verde en un semáforo, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$G_i = (v/s)_i / S (v/s) \times GT$$

Dónde:

G_i = longitud del intervalo verde para fase "i"

(v/s) i = flujo crítico para fase "i"

GT = tiempo verde disponible para el ciclo

Con esta ecuación se puede obtener el tiempo de ciclo verde para cada fase.

Se muestra la siguiente tabla que muestra los valores del tiempo verde en cada intersección.

		Yi Max	Y Total	Ciclo optimo	Tiempo verde efectivo 1	Tiempo verde efectivo 2
Av 9 PTE.	Calle 16 sur	0.43	0.85	64	40	24
	Calle 8 sur	0.43	0.63	64	40	24
	AV. Juarez	0.43	0.75	64	40	24
	Calle 7 sur	0.43	0.69	64	40	24

Sincronización de los semáforos

El objetivo para sincronizar los semáforos es para permitir un flujo continuo de vehículos y evitar el tráfico vehicular.

Se va a tomar en cuenta el tiempo de desfase óptimo, el cual se obtiene del tiempo que le toma a un vehículo llegar de un semáforo a otro semáforo de manera consecutiva.

El desfase se aplicará de tal forma que el vehículo que está esperando la señal verde en el semáforo, llegue al siguiente semáforo con la velocidad permitida y encuentre al semáforo en señal verde para avanzar y permitir un flujo vehicular continuo.

Se necesita saber la distancia de entre los semáforos en avenida 9 Pte., la cual se muestra a continuación.

Calle	Distancia
Calle 16 sur	125 m
Calle 8 sur	125 m
AV. Juarez	125 m
Calle 7 sur	125 m

Las distancias anteriores es una distancia promedio, de la longitud entre cada calle donde se encuentran los semáforos.

Para calcular el tiempo de desfase entre semáforos se tomará en cuenta al vehículo de mayor flujo que en este caso es el auto, a una velocidad de 30 km/h que es la velocidad promedio.

De la fórmula:

$$t = \frac{Ep}{Vp}$$

Donde:

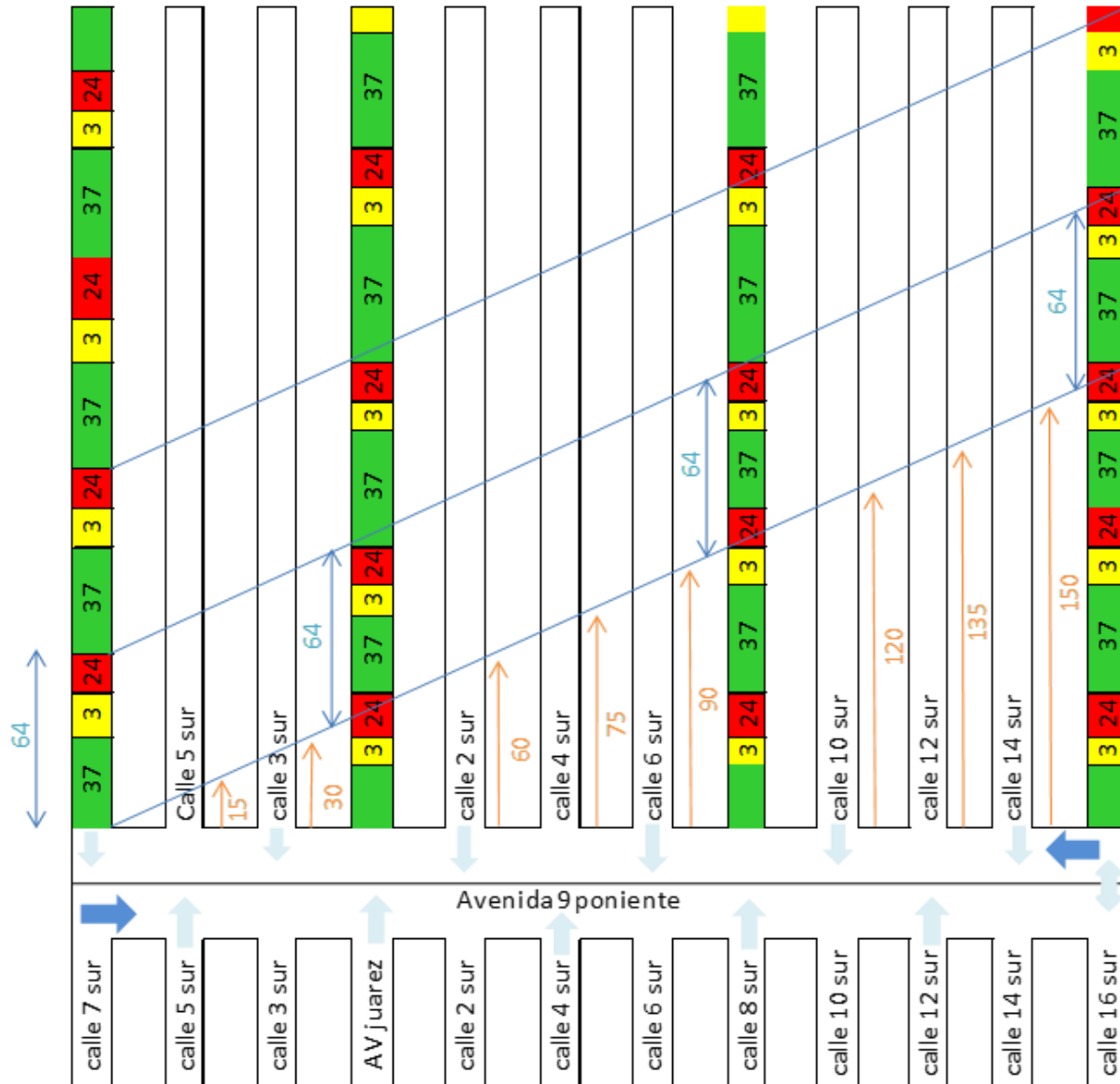
- T= tiempo
- Espacio promedio
- Velocidad promedio

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$t = \frac{125}{30} \times \frac{3600}{1000} \quad t = 15 \text{ segundos}$$

Diagrama de fases y tiempos

Una vez obtenidos los valores de tiempo y tiempos de ciclos óptimos se realiza un diagrama de fases y tiempos de sincronización de los semáforos que se muestra a continuación.



Resultados de simulación

El objetivo de la simulación de la sincronización de los semáforos es obtener un flujo vehicular constante.

En resumen, para la sincronización de los semáforos se tomó en cuenta:

- flujo de vehículos en una determinada hora
- Tipos de vehículos
- flujo de saturación
- Factor por ancho de carril
- Factor por vueltas a la izquierda
- Factor por vueltas a la derecha
- Factor por peatones y ciclistas
- Factor de velocidad (30 km/h)

Con los puntos antes mencionados se calcula la sincronización de los semáforos con los datos obtenidos mediante una visita al campo de estudio, como se menciona anteriormente.

Mediante la sincronización adecuada de los ciclos de los semáforos, se logrará reducir los tiempos de espera por vehículo y así optimizar el flujo vehicular en avenida 9 poniente en todas sus intersecciones en la ciudad de Tecamachalco puebla.

Conclusiones

El flujo vehicular en avenida 9 poniente es la principal vía con mayor flujo en la ciudad de Tecamachalco. Las horas de máxima demanda por la mañana es 9:30, por la tarde de 14:30 a 16:30 y en la tarde 19:30. En las intersecciones con la calle de 7 sur, Avenida Juárez, calle 8 sur y calle 16 sur.

Con una buena sincronización adecuada de los ciclos de los semáforos se logra reducir el tiempo de espera por vehículo, así mismo como las filas de espera de los diferentes vehículos que transitan por la avenida 9 poniente y sus intersecciones.

Los resultados que se muestran son de gran importancia y son indispensables para determinar el flujo vehicular constante mediante una buena sincronización de los semáforos en avenida 9 poniente en la ciudad de Tecamachalco.

Está comprobado que un flujo vehicular constante reduce la emisión de dióxido de carbono y reduce el estrés de la población, por lo tanto, es un tema importante para la ciudad de Tecamachalco. Una buena sincronización de los ciclos de semáforos tiene muchos beneficios para temas ambientales y salud mental de los humanos.

Para que el estudio realizado se implemente de forma correcta se debe de tomar en cuenta que se debe evitar obstruir las calles que es causante de nos llevan a la congestión vehicular.

Bibliografías

1. Shannon Robert (2003) Simulación de Sistemas, Diseño, Desarrollo e Implementación. Abelardo Pérez Uzcanga (ed). Capítulo fundamentos del modelado (pp: 11-49). Trillas, México DF.
2. Roman Frigg and Stephan Hartmann. Models in science. In Edward N. Zalta, editor, The Stanford Encyclopedia of Philosophy. 2012.
3. Lydia Galagovsky and Agustín Adúriz-Bravo. Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. el concepto de modelo didáctico analógico. Enseñanza de las ciencias, 19(2):231–242, 2001.
4. Cervantes gomez L.(2015). Modelización matemática Principios y aplicaciones. Benemérita universidad autónoma de Puebla. P(17).
5. Treiber, M. & Kesting A((2013). Traffic flow dynamics data, models and simulation. (M. treiber, & C. Thiemann, trads.) Springer Berlin Heidelberg.
6. Helbing D. Traffic and related self-driven many-particle systems. Reviews of Modern Physics. (2001);73(4):1067-141.
7. Fernández López M.A., Fernández Y. González Hernández D., Olmedillas Blanco B., El factor regulación como determinante del consumo energético y de las emisiones de CO₂. Cuadernos de Economía 2014 <http://dx.doi.org/10.1016/j.cesjef.2013.12.002>.
8. Martínez Salgado H., Estudio de emisiones y características vehiculares en ciudades mexicanas, Centro de Transporte Sustentable de México A.C. 27 de Octubre de 2011.