

UNIVERSIDAD PANAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA**

**“EL PROBLEMA DE TRÁNSITO EN LA CIUDAD DE
MÉXICO. ¿AYUDARÁN LOS SEMÁFOROS
INTELIGENTES?”**

T E S I N A

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA**

**PRESENTA
ING. MICHEL BECHARA BITAR**

**ASESOR DE TESINA
DR. HIRAM EREDIN PONCE ESPINOSA**

RESUMEN.

Está demostrado que la Ciudad de México es la ciudad que presenta el mayor tráfico vehicular en todo el mundo, lo que deriva en excesivas horas perdidas por los conductores y una grande cantidad de gases contaminantes liberados por los vehículos.

Durante el desarrollo de esta tesina, se analizaron las razones por las cuales la Ciudad de México es perjudicada por este problema. Además, se propuso una posible solución al mismo: la implementación de semáforos inteligentes en las calles y avenidas de la ciudad.

Dicha acción ha sido exitosa en varias ciudades alrededor del mundo, pero ninguna de ellas presenta ciertas características que sí presenta la Ciudad de México en cuanto a tamaño y desorden. Para demostrar si los semáforos inteligentes funcionarían en esta ciudad, se simuló en un *software* especializado el tránsito en avenidas importantes y representativas de la misma, utilizando semáforos convencionales e inteligentes.

El sistema se alimentó con variables reales como el número de coches por minuto que transitan las avenidas y la duración de las luces de los semáforos, para representar el sistema lo más parecido a lo que las avenidas seleccionadas son en la vida real. Para hacer posible esto, se salió a explorar ciertas calles de la ciudad y a medir las variables mencionadas anteriormente, entre otras.

Seguido de esto, se utilizó la técnica de diseño de experimentos para realizar la experimentación, y el *software* de simulación de procesos "Simio®". La ruta seleccionada mide cerca de tres kilómetros, e incluye tres avenidas importantes y una calle al sur de la Ciudad de México, que en horas pico presentan problemas intensos de tráfico.

Como resultado de las simulaciones, se obtuvo que, utilizando semáforos inteligentes, durante un año entero se podrían reducir 165 mil horas diarias de tránsito en la ciudad, lo que equivale a 42 millones de horas durante el año, contando solo días hábiles.

Esto se logra con una pequeña aportación de todos los vehículos de la ciudad. Si bien cada vehículo por separado reduciría en pequeña cantidad su tiempo de traslado, al juntar todos los vehículos que transitan diariamente en la ciudad se obtiene una cifra importante.

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS.

Quiero dedicar este trabajo a mi familia, que siempre me ha apoyado en todos los momentos importantes de mi vida.

A mis hermanos Anuar y Eduardo, y especialmente mis padres, Anuar y Elena, por procurar siempre lo mejor para mí, y dejarme la mejor herencia que puede haber en la vida. Una buena educación, personal y académica.

También quisiera agradecer el apoyo y contribución del Doctor Hiram Eredin Ponce Espinosa, mi asesor de tesina, por sus valiosos consejos y recomendaciones, y siempre tener su oficina abierta para discutir sobre la investigación.

Además, agradezco al Doctor Ernesto Leonides Rodríguez González y al Doctor Roberto González Ojeda, por sus grandes enseñanzas durante los seminarios.

Por último, agradezco a mi compañera Dea que, durante todo momento de esta investigación, me apoyó y aconsejó.

Sin el apoyo de todos ustedes, este trabajo no hubiera sido posible.

ÍNDICE.

<u>1. INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>5</u>
<u>2. OBJETIVO GENERAL.....</u>	<u>9</u>
<u>3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</u>	<u>9</u>
<u>4. HIPÓTESIS.....</u>	<u>9</u>
<u>5. ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA CUESTIÓN.....</u>	<u>10</u>
<u>6. DESARROLLO.....</u>	<u>19</u>
<u>7. METODOLOGÍA.....</u>	<u>24</u>
<u>8. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS.....</u>	<u>34</u>
<u>CONCLUSIONES.....</u>	<u>41</u>
<u>SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.....</u>	<u>42</u>

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.

Figura 5.1.1: diagrama de las partes de un semáforo.....	12
Figura 5.5.1: comparación de ciudades con semáforos inteligentes.....	18
Figura 6.1: velocidad promedio de automóviles en la Ciudad de México con el paso de los años.....	19
Tabla 6.2: muestra de velocidades promedio en días comunes en la Ciudad de México, entre las 7 y 10 de la mañana.....	20
Tabla 6.3: muestra de velocidades promedio en días comunes en la Ciudad de México para cuatro destinos diferentes.....	21
Figura 6.4: comparación del límite inferior y superior de la velocidad promedio en la Ciudad de México.....	21
Figura 7.1.1: mapa de la ruta a estudiar.....	25
Tabla 7.2.1: duración real de las luces de cada semáforo del sistema.....	26
Tabla 7.2.2: autos por minuto reales que circulan por cada intersección del sistema.....	27
Tabla 7.3.1: diseño del experimento.....	28
Tabla 7.3.2: iteraciones posibles del experimento.....	29
Figura 7.3.3: diagrama de flujo de la programación del semáforo convencional.....	29
Figura 7.3.4: diagrama de flujo de la programación del semáforo inteligente.....	30
Tabla 7.5.1: comparación de autos por minuto por semáforo entre realidad y simulación.....	32
Figura 8.1: fotografía de una de las iteraciones simuladas durante la experimentación...34	
Tabla 8.2: tiempo promedio que cada entidad permanece en el sistema para cada iteración.....	35
Figura 8.3: gráfica del tiempo promedio que cada entidad permanece en el sistema para cada iteración.....	36
Tabla 8.4: tiempo promedio que cada entidad tarda en recorrer cada uno de los tramos del sistema.....	36
Tabla 8.5: tiempo que dura el alto y el siga en cada semáforo del sistema, en modo convencional y en modo inteligente.....	38
Tabla 8.6: tiempo promedio que cada entidad permanece en el sistema con semáforos inteligentes solo en cada uno de los tramos.....	39

1. INTRODUCCIÓN.

La Ciudad de México es una de las ciudades más pobladas del mundo. De acuerdo al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología en México, CONACYT, (Bonilla, 2015) la Organización de las Naciones Unidas afirma que dicha ciudad ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en cuanto a cantidad de habitantes, con una población aproximada de 21 millones de personas (contando área metropolitana), por detrás de la ciudad de Shanghai (23 millones), Nueva Delhi (25 millones) y Tokio (38 millones).

Además, la Ciudad de México es la tercer ciudad más grande del mundo en cuanto a extensión geográfica, con una superficie de 7,854 kilómetros cuadrados, solo por detrás de la ciudad de Tokio (14,763 kilómetros cuadrados) y la ciudad de Nueva York (19,765 kilómetros cuadrados) (Ciudades30, 2015b).

Por otro lado, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (INEGI, 2015a) afirma que la Ciudad de México es una de las más densamente pobladas del mundo, con una población de 5,967 habitantes por kilómetro cuadrado.

Al ser dicha ciudad tan grande en cuanto a extensión geográfica y población, presenta un problema importante. El problema de congestiones vehiculares severas por las calles, provocando tráfico, contaminación, pérdida de tiempo, enfermedades respiratorias, entre muchas otras cosas. Este problema lo presentan todas las grandes ciudades del mundo, entre las cuales destacan ciudades de los Estados Unidos de América, Japón y China. Sin embargo, el hecho de que la Ciudad de México es una ciudad en desarrollo, desordenada y no totalmente desarrollada, agrava mucho más el problema.

El diario El Financiero (Chávez, 2016) afirma que la empresa holandesa “Tom Tom”, fabricante de sistemas de navegación para automóviles, señala que, solo en la Ciudad de México, los automovilistas invierten en promedio 242 horas al año en traslados. Esto es equivalente a dos años y tres meses, a lo largo de toda una vida. Además, según la misma empresa, dicha ciudad es la que presenta el mayor incremento porcentual en el mundo en tiempos de traslado provocado por tráfico vehicular, con un 59% adicional. De acuerdo a este estudio, la Ciudad de México es más afectada por el tráfico que otras ciudades del mundo que inclusive la superan en tamaño geográfico y poblacional. Esto se debe al gran desordenamiento que presenta.

En los últimos años, el gobierno de la Ciudad de México ha hecho esfuerzos para atacar el problema de la movilidad en la ciudad, sin embargo, el énfasis se ha puesto prácticamente en todo tipo de transportación menos automóviles particulares. En el año 2005 se inauguró la primera línea de Metrobus en la ciudad, actualmente se cuentan con cinco líneas. En el año 2011, se inauguró la línea doce del Metro, para sumarse a otras once líneas ya existentes. También, existen alrededor de la ciudad ocho líneas de trolebús (camiones eléctricos), así como la Red de Transporte de

Pasajeros, RTP (camiones de gasolina). Además, la Ciudad de México fue la primera de América Latina en contar con un sistema de bicicletas públicas, con las llamadas Ecobici (Leo et al, 2017). Estos esfuerzos son sin duda muy valiosos, pero ninguno de ellos va dirigido a los conductores de automóviles particulares, al menos no de manera directa. Por otro lado, la Ciudad de México ha realizado también esfuerzos por optimizar espacios de tránsito. Sin embargo, esto es un esfuerzo limitado ya que se llega a un punto en que el espacio simplemente ya no es suficiente (Calvert et al, sin fecha).

Existe mucha gente en la Ciudad de México cuya calidad de vida se ve afectada por el problema de tráfico, ya que se ven forzados a tomar decisiones drásticas que no tomarían en condiciones normales, como el renunciar a sus empleos debido al excesivo tiempo de traslado en automóvil. Una de las seis razones principales que lleva a la gente a renunciar a sus empleos es desperdiciar horas de su día en el tráfico durante su traslado a la oficina, cuando el tiempo de traslado sin tráfico sería mucho menor (Mundo Ejecutivo, 2016c).

Además, la Ciudad de México ha presentado también problemas graves de contaminación en los últimos años, lo que ha llevado al gobierno a crear programas como el “no circula”, o el “doble no circula” (SEDEMA, 2014) en los cuales se imposibilita a dueños de vehículos altamente contaminantes que utilicen su auto uno o dos días a la semana. Sin embargo, una mejor solución al problema no sería privar a los conductores del uso de sus vehículos, sino tomar acciones para, de alguna forma, optimizar el tránsito de la ciudad para provocar menos emisión de gases contaminantes. Según un estudio de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA, 2016a), en el 2016 se presentó un máximo histórico de contingencias ambientales en la ciudad.

Uno de los principales factores que llevó a la creación de dichos programas es que, desde el 2006, la Ciudad de México no ha presentado disminución en los niveles de ozono en la atmósfera. De hecho, durante al menos dos semanas en los últimos cinco años, se han presentado incrementos del límite por hora de 95 partes por billón de ozono (Velasco y Retama, 2017). Esto ocurre principalmente por que los automóviles liberan más gases contaminantes por kilómetro a la atmósfera cuando transitan a una velocidad menor a 50 kilómetros por hora (Bellefleur, 2012).

Así mismo, cabe mencionar el hecho de que cada vez es más sencillo adquirir un automóvil. Ya no es necesario juntar una gran cantidad de dinero (100 mil, 200 mil o 300 mil pesos) para comprar este producto. Hoy en día, empresas automotrices ofrecen vehículos con simplemente un 10% del valor del mismo como enganche, pagando a meses sin intereses el resto del valor del automóvil.

De hecho, de acuerdo al INEGI (INEGI, 2016e), el número de vehículos que transitan por las calles de la Ciudad de México ha aumentado exponencialmente con el paso de los años. En 2005, circulaban alrededor de 2.7 millones de automóviles, mientras que en 2016 la cifra era de 5.7 millones. Anterior a esto, el crecimiento no era tan rápido. Si nos remontamos hasta 1980, circulaban por la

ciudad alrededor de 1.8 millones de vehículos. Es decir, en 25 años (de 1980 a 2005) solo incrementó la cantidad de vehículos en 0.9 millones. Pero después de esto, en solo once años, de 2005 a 2016, el crecimiento se aceleró y aumentó la cifra en 3 millones.

La cantidad de vehículos ha aumentado más en los últimos once años de lo que anteriormente lo hizo durante 25 años. Esto se debe a que hoy en día existen muchas más facilidades para comprar un automóvil.

Por otro lado, existen muchos problemas con los camiones que transitan por las calles, debido a que muchas veces no están planeadas para ellos. En ciertas ocasiones, los camiones crean excesivo tráfico al ocupar dos carriles al mismo tiempo, obstruir el paso cuando dan vuelta, utilizar puentes o túneles no diseñados para vehículos de gran tamaño, inclusive deteriorando la infraestructura si transitan por calles que no pueden soportarlos (Jaller et al, 2016). Estos problemas generalmente no se presentan en ciudades totalmente desarrolladas ya que cuentan con una mucho mejor planeación y arquitectura de la ciudad.

Por último, otro factor que entorpece el tránsito en la Ciudad de México, y la calidad de vida de sus ciudadanos, son los topes. Existen muchos topes en la ciudad, especialmente en zonas en donde no hay muchos semáforos instalados. Éstos tienen el propósito de limitar la velocidad de los automóviles, lo cual en muchas ocasiones funciona. Sin embargo, está demostrado que aumentan los niveles de Monóxido de Carbono, Dióxido de Carbono y Óxido de Nitrógeno 117%, 90% y 195%. Esto causa mucha contaminación, y se debe a que los vehículos deben frenar y acelerar en varias ocasiones, y muchas veces de forma innecesaria (Daham et al, 2015).

Todas las razones y problemas expuestos anteriormente comparten una misma raíz, por lo menos en la Ciudad de México. La renuncia de empleos e incrementos graves de contaminación, son provocados en cierta medida por excesivo tráfico. Además, calles mal diseñadas y el hecho de que cada vez sea más sencillo adquirir un automóvil, provocan aún más tráfico, lo cual agrava los dos primeros problemas. Esto se convierte en un círculo vicioso, y hace pensar que el problema de tráfico vehicular en la Ciudad de México es grave.

Por lo tanto, es posible considerar que, el solo hecho de reducir el problema del tráfico, además de ahorrar a los conductores grandes horas en tiempos de traslado, reducirá aparte problemas de contaminación y renuncia de empleos, y, por otro lado, la facilidad en compra de vehículos no impactaría al nivel en que lo hace actualmente. Es decir, se generarían beneficios en todas estas áreas mencionadas, que también tienen cierto grado de urgencia.

Una propuesta para solucionar este problema, es optimizar y mejorar los semáforos de las calles de la ciudad. Una de las razones por las cuales ciudades primermundistas de igual o casi igual tamaño que la Ciudad de México no presentan este problema, es porque cuentan con un proyecto serio de semáforos inteligentes.

Semáforos que no solo actúan sistemáticamente cambiando los colores de las luces después de ciertos segundos, sino que toman decisiones por sí solos dirigidas a la disminución de tráfico, y han presentado resultados positivos.

Sin embargo, al ser la Ciudad de México tan impresionantemente grande en todos los sentidos, al ser una ciudad tan desordenada y en vías de desarrollo, al utilizar semáforos inteligentes, ¿se obtendrán resultados positivos de disminución de tráfico vehicular, como ha sucedido en otras ciudades grandes del mundo ya desarrolladas, o en vías de desarrollo, pero de mucho menor tamaño? Si es así, ¿cómo tendrían que funcionar estos semáforos para que brinden resultados positivos?

La siguiente investigación se enfocará en simular un sistema con semáforos inteligentes, que tenga el objetivo de reducir el tráfico vehicular en las calles y avenidas más afectadas por este problema en la ciudad. Además, se hará énfasis en entender cómo tendrían que funcionar estos semáforos y qué consecuencias traerían a las avenidas de la intersección en la cual están instalados para que cumplan con su objetivo.

Para realizar la simulación, se seleccionará una ruta compuesta por tres avenidas y una calle de la ciudad que presenten grandes problemas de tráfico. Se representará la ruta en el *software* de simulación, y se medirán variables reales de la misma, entre las cuales destacan la cantidad de autos por minuto que circulan por cada intersección, y la duración de las luces de los semáforos. Estas variables serán alimentadas al sistema para que la simulación sea lo más parecido posible a la realidad.

Posteriormente, se correrá una simulación con semáforos como se encuentran en la vida real, es decir, no inteligentes, y después se realizarán simulaciones con semáforos inteligentes (el funcionamiento de ambos tipos de semáforos será explicado más adelante en este escrito). Se extraerán resultados numéricos de las simulaciones, y así se podrá demostrar numéricamente si, en efecto, los semáforos inteligentes ayudan a disminuir el tráfico vehicular en la ruta seleccionada, al comparar los resultados obtenidos de las simulaciones con ambos tipos de semáforo, y detectar si hubo o no mejoras.

Si se dan resultados positivos, será posible inferir que, si los semáforos inteligentes funcionaron en las calles y avenidas seleccionadas, funcionarán también en muchas otras que formen una ruta similar.

2. OBJETIVO GENERAL.

Simular el tránsito vehicular en un sistema que contenga avenidas importantes y representativas de la Ciudad de México utilizando semáforos convencionales e inteligentes, para comparar resultados entre ambas simulaciones y detectar si los semáforos inteligentes ayudan a disminuir el problema de tráfico en dicha ciudad.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Seleccionar una muestra de calles y avenidas de la Ciudad de México que presentan graves problemas de tráfico vehicular.
- Investigar y entender el funcionamiento de los principales algoritmos de programación de semáforos convencionales y semáforos inteligentes.
- Seleccionar un *software* de simulación en el cual se pueda simular el tránsito en las avenidas seleccionadas con semáforos convencionales e inteligentes.
- Programar el algoritmo, simular el proceso y recabar resultados.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos, para ser capaz de generar recomendaciones para la implementación de semáforos inteligentes en la Ciudad de México.

4. HIPÓTESIS.

Si se logra simular un sistema con semáforos inteligentes en un entorno que se comporte de manera similar al entorno de la Ciudad de México, entonces se podrá comparar y medir numéricamente la situación del tránsito con semáforos convencionales y con semáforos inteligentes, por lo tanto, se podrá comprobar si, en efecto, los semáforos inteligentes son la solución para el problema de excesivo tráfico vehicular en dicha ciudad.

5. ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA CUESTIÓN.

Uno de los más grandes inventos de la humanidad ha sido la invención del automóvil. Aquel medio de transporte que permite el rápido desplazamiento de personas y productos de un lugar a otro, reduciendo de manera importante tiempos de traslado. De acuerdo a la Organización Internacional de Constructores de Automóviles (Alegret, 2014), OICA por sus siglas en francés, para 2014, en el mundo circulaban más de 1,200 millones de automóviles. Esto brinda una idea de la importancia del automóvil. Facilita en gran medida la transportación para aquella persona que posea uno.

Sin embargo, el que existan tantos autos en el mundo tiene su lado negativo, como todo en la vida. Millones de personas se desplazan en ellos diariamente, a cambio de un grave aumento de contaminación ambiental, contaminación visual y contaminación auditiva. Por otro lado, lo que pretende ser un producto para reducir tiempos de traslado puede llegar a provocar el efecto contrario, debido a la alta cantidad de vehículos que circulan las calles de las ciudades más importantes del mundo, provocando tráfico y congestiones vehiculares graves.

Cuando surgió el problema de los congestionamientos vehiculares, llegó otra gran invención: el semáforo. Aquel artefacto que pretende controlar el flujo vehicular en una intersección entre calles, al utilizar luces de colores para indicar el turno en que los automovilistas de cierta calle pueden cruzar la intersección. Sin embargo, con la cantidad de autos que existen actualmente, esto no es suficiente para resolver el problema. El tránsito en las grandes ciudades no deja de ser pesado, alto y desgastante, a pesar del uso del semáforo.

Por esta razón, el invento del semáforo ha evolucionado. Hoy en día, con el increíble avance de la tecnología y ciencia, existen ya semáforos inteligentes que pretenden disminuir congestiones vehiculares. A continuación, se realizará un análisis acerca del funcionamiento y aplicaciones de semáforos inteligentes en el mundo, y cómo éstos han ayudado a la reducción del problema del tráfico en distintas ciudades.

Sin embargo, para comprender con mayor facilidad el funcionamiento de los semáforos inteligentes, es necesario comenzar por entender los aspectos básicos del tema.

5.1. Aspectos básicos y breve historia del semáforo.

La Universidad Rafael Urdaneta (Morales y González, 2013) define al semáforo como un dispositivo eléctrico que tiene como objetivo ordenar y regular el tránsito de vehículos y peatones en calles y carreteras por medio de luces, operadas por una unidad de control.

El semáforo tiene ya más de un siglo de vida. El primer semáforo fue instalado en la ciudad de Londres, Inglaterra, en el año de 1868. Aquel semáforo fue inventado

por el ingeniero británico John Peake Knight. Este semáforo ya contaba con algunas similitudes con respecto a los que se conocen actualmente. Se utilizaba desde ese entonces un color rojo para indicar alto, y color verde para indicar que se podía avanzar (no existía la luz amarilla). Sin embargo, el semáforo era totalmente manual, se requería una persona operándolo las 24 horas del día, y utilizaba lámparas de gas (Cachaldora, 2017).

Varias décadas más tarde, en 1912, el ingeniero Ernest Serrine innovó el semáforo al utilizar luces eléctricas en lugar de lámparas de gas. Sin embargo, aún necesitaba un operario para su funcionamiento. Fue hasta 1917 que el ingeniero William Ghilieri patentó el primer semáforo automático, en la ciudad de San Francisco, California, y en 1920 el ingeniero William Potts añadió la luz amarilla para erradicar el cambio repentino de luz verde a luz roja (Cachaldora, 2017).

Se necesitaron cuatro décadas más para que se instalara el primer semáforo que no regulara la circulación de automóviles, sino que regulara la circulación de peatones. Esto se dio en la ciudad de Berlín, Alemania (Cachaldora, 2017).

Con el paso de los años, los semáforos fueron evolucionando en cuanto a diseño exterior e interior. Llegó el siglo XXI, y, gracias al avance de la ciencia y tecnología, se crearon los primeros semáforos inteligentes, capaces de tomar decisiones por sí mismos e intercomunicarse entre ellos para reducir las congestiones vehiculares (Cachaldora, 2017).

Otra innovación importante que se dio en nuestro siglo fue la sustitución de las bombillas incandescentes por luces LED (Light Emitting Diode, por sus siglas en inglés). Esto representó un ahorro de 90% de energía a comparación de las bombillas incandescentes. Además, las luces LED tienen una vida útil 50 veces superior (Cachaldora, 2017).

De acuerdo a un artículo de la Universidad Nacional de Colombia (Valencia, 2000), el semáforo que se conoce hoy en día (semáforo con bombilla y semáforo con luces LED) está conformado por los siguientes componentes (figura 5.1.1):

- Cabeza: armadura que contiene las partes visibles del semáforo.
- Soportes: estructuras que sujetan la cabeza del semáforo.
- Cara: distintas luces por las cuales el semáforo está compuesto.
- Lente: unidad óptica que dirige la luz de la lámpara hacia la dirección deseada. Este componente desaparece en los semáforos con luces LED.
- Visera: elemento colocado encima de cada lente para evitar que los rayos del Sol incidan sobre éstos. Este componente también desaparece con los semáforos con luces LED.
- Placa de contraste o pantalla antirreflejante: elemento que ayuda a incrementar la visibilidad de la luz del semáforo.

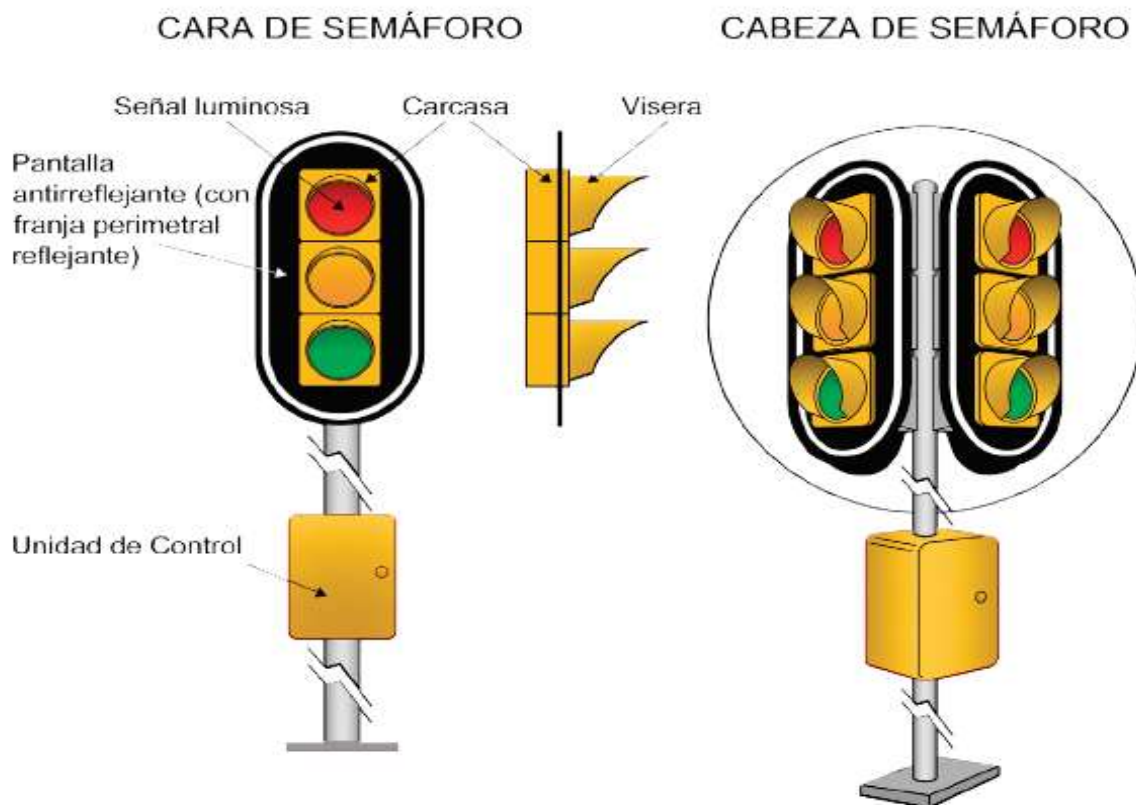


Figura 5.1.1: diagrama de las partes de un semáforo (SCT, sin fecha).

5.2. Tipos de semáforo.

Como se ha mencionado anteriormente, el semáforo ha evolucionado y avanzado tanto desde sus inicios hace más de un siglo, que hoy en día existen diversos tipos de este artefacto. De acuerdo a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en México (SCT, sin fecha), pueden ser catalogados de la siguiente manera, por su aplicación:

- Semáforo vehicular: su objetivo es controlar el tránsito de vehículos en las intersecciones de calles y avenidas. Cuenta con la luz roja, verde y amarilla. Es el más conocido y usado en el mundo.
- Semáforo direccional: tiene la finalidad de indicar el momento preciso en que los automóviles pueden girar a la derecha o izquierda. Cuenta también con luces de los tres colores convencionales.
- Semáforo peatonal: ayuda a controlar el cruce de peatones sobre calles y avenidas, consiguiendo que el cruce en las mismas sea seguro a pesar del tránsito vehicular. Este semáforo carece de la luz amarilla.

- Semáforo para invidentes o con señal acústica: es un semáforo peatonal, al que se le agregan dispositivos sonoros, cuyas señales auditivas indican a una persona con discapacidad visual en qué momento puede atravesar la avenida con seguridad.
- Semáforo intermitente o de destello: este semáforo cuenta con una luz amarilla, y dos luces rojas. Su función es llamar la atención de los automovilistas en las intersecciones. Generalmente se utiliza en altas horas de la noche cuando puede llegar a ser peligroso para los automovilistas detenerse en una calle oscura por una luz roja en el semáforo.

Por obvias razones, los semáforos más utilizados en las ciudades del mundo son los vehiculares y peatonales, ya que es de la manera en que la mayoría de la gente se transporta.

5.3. Semáforos inteligentes.

Todos los semáforos mencionados anteriormente fueron capaces de regular el tránsito en las ciudades más importantes del mundo durante varias décadas, optimizando el mismo y reduciendo accidentes automovilísticos. Sin embargo, la población ha crecido de forma exponencial.

Si sumamos el incremento de población que se da naturalmente en el mundo, con las mayores facilidades que se dan cada día para comprar un automóvil, el resultado es un incremento descontrolado de vehículos que circulan por las calles de las ciudades más importantes del mundo, que causa problemas de alto tráfico vehicular.

Por esta razón, se propuso entre los ingenieros del mundo el pensar en una solución a este problema, y como primer acercamiento se dio la creación de semáforos inteligentes, cosa que ha sido posible gracias a los grandes avances que ha tenido la ciencia y tecnología durante el siglo XXI.

Durante la Conferencia Internacional en Sistemas Computacionales Inteligentes (Arora y Banga, 2012) se resaltó esto. Se afirma que el paso de semáforos convencionales a semáforos inteligentes se dio en el momento en que se integraron sensores al semáforo, para que sea capaz de medir la cantidad de automóviles en cada avenida de cierta intersección, y con base en eso tomar decisiones referentes al cambio de las luces, en beneficio del tránsito.

La Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción (Martínez, 2013) también habla respecto al tema. Afirma que el semáforo convencional será aquel que no sea capaz de tomar decisiones por sí mismo. Simplemente cambiará sistemáticamente, después de cierto tiempo, de verde a amarillo, de amarillo a rojo y de rojo a verde. Por otro lado, define al semáforo inteligente como aquel que será capaz de tomar decisiones por sí mismo, dependiendo de una serie de variables externas que se presentan en el momento, como el flujo de vehículos o velocidad media de los

mismos, todo con el fin de reducir el tráfico vehicular, concordando prácticamente al 100% con la definición anterior.

Además, prosigue indicando que existen diversos tipos de semáforos inteligentes, basados en diferentes algoritmos de programación (Martínez, 2013):

- Semáforo con identificación por radiofrecuencia: este tipo de semáforo inteligente tiene como objetivo hacer variar los tiempos de espera en las intersecciones, de acuerdo a la congestión vehicular presentada en el momento. Además, se da una comunicación entre semáforos a través de internet.
- Semáforo con redes de sensores inalámbricos: este semáforo inteligente tiene las mismas bases que un semáforo con identificación por radiofrecuencia. Sin embargo, presenta dos componentes adicionales: una red de sensores inalámbricos diseñados para proporcionar la infraestructura de comunicación de tráfico y facilitar el flujo del tránsito, y una estación base, que se encarga de ejecutar los algoritmos de control según las variables medidas por los sensores.
- Semáforo con procesamiento de imágenes: este tipo de semáforo inteligente cuenta con un sistema de procesamiento de imágenes, lo cual hace posible medir la densidad del tráfico y modificar la duración de las señales, según los resultados. Se captura una imagen de la calle vacía, que se guarda en el semáforo como referencia. Después, ya en tiempo real, el semáforo captura la calle con el tráfico actual, y de acuerdo a la coincidencia entre la imagen actual y la imagen de referencia es que se modifica la duración de las señales (ejemplo: coincidencia entre imágenes de 10%, luz verde encendida durante 90 segundos. Coincidencia entre imágenes entre 11% y 50%, luz verde encendida durante 60 segundos, etc).
- Semáforo con inteligencia artificial: la incorporación de la inteligencia artificial en los semáforos ha guiado a la creación de diversas aplicaciones de este tipo de inteligencia para optimizar y mejorar los mismos, como por ejemplo la lógica difusa, tecnología que permite la aplicación de las reglas de la vida real similar a la manera en que los seres humanos podrían pensar.

Además de estas tres tecnologías, existe otro algoritmo de programación inteligente de semáforos. La sincronización inteligente de semáforos, o como se le conoce comúnmente, la “ola verde”, es una programación que logra que todos los semáforos de una avenida enciendan la luz verde con pocos segundos de diferencia, para lograr que los automóviles que circulan por la avenida avancen sin detenerse, o deteniéndose lo menos posible, al encontrarse con puras luces verdes en los semáforos. De igual forma, la luz roja se encenderá al mismo tiempo en todos ellos. Esto evita que los automovilistas se detengan varias veces innecesariamente, al esperar en su semáforo a que encienda la luz verde, pero justo cuando enciende

dicha luz, el próximo semáforo enciende la luz roja, por lo que el conductor se ve obligado a detenerse de nuevo unos metros más adelante (Botín, 2014).

Por último, gracias al avance de la tecnología en los últimos años, se ha logrado implementar la inteligencia artificial para crear otro tipo de semáforos inteligentes. Estos semáforos ocupan principalmente lógica difusa, tecnología que permite la aplicación de las reglas de la vida real similar a la manera en que los seres humanos podrían pensar. En el caso de un semáforo, se trata de simular a un policía controlando el flujo vehicular en una intersección, priorizando la avenida que presente más tráfico (Jin et al, 2017).

5.4. Aplicaciones de semáforos inteligentes en el mundo.

Una cosa es la teoría y la idea de generación de semáforos inteligentes, y otra cosa es aplicar la idea y que en verdad funcione. Existen muchos ejemplos alrededor del mundo que demuestran que este tipo de semáforos puede funcionar y cumplir con su objetivo, si es que se aplica correctamente. A continuación, se enlistan ejemplos de esto:

- Noticiero BBC (Resnick, 2015) afirma que, en la Ciudad de Nueva York, en donde en 2012 se instalaron semáforos inteligentes en avenidas gravemente afectadas por tráfico, se ha producido una reducción neta del 25% en las congestiones vehiculares. Se calculó una media de ahorro de tiempo de cinco segundos por auto, al día. Esto puede sonar insignificante, pero al escalar los números a los tamaños de una ciudad como Nueva York, se ahorran alrededor de 1,100 horas al día en conducción, o 406,000 horas al año.
- Otro ejemplo se dio en la ciudad de Bucarest, capital de Rumania. Se registraron los picos de flujo de tráfico en dos de los principales cruces de la ciudad. Se les suministró a los semáforos información acerca de la posición y velocidad de todos los vehículos en calles cercanas, y se les programó para calcular con dicha entrada el tiempo de duración de las luces de los semáforos. Con esto se obtuvo una reducción de 6.5% en emisiones de gases contaminantes, y una reducción de 28% en horas de espera por tráfico vehicular en dichas avenidas de la ciudad (Martínez, 2008).
- En la ciudad de Pittsburgh, Estados Unidos, se han probado en los últimos años semáforos inteligentes para racionalizar el tráfico, y se logró reducir en 40% el tiempo en que los automóviles permanecen detenidos en un trayecto normal y en un 25% la duración total del viaje (Cuesta, 2016).
- En la ciudad de Toronto, Canadá, se programaron semáforos para que utilizaran la “teoría de juegos” (“estudia de manera formal y abstracta las decisiones óptimas que deben tomar diversos adversarios en conflicto, pudiendo definirse como el estudio de modelos matemáticos que describen el conflicto y la cooperación entre entes inteligentes que toman decisiones”

(F. Fernández, 2005)), con lo que se logró reducir un 40% los tiempos de espera medios en los semáforos, y hasta un 25% el tiempo total en que las personas se trasladan desde sus casas, hasta sus trabajos. El autor asegura que los efectos positivos de esta iniciativa, como acortar tiempos de traslado, mejoras ambientales y mayor seguridad en las calles se manifiestan rápidamente (Soler, 2014).

- En una ciudad holandesa, se implementó un algoritmo inteligente para programar los semáforos de tal forma que un automóvil no se vea forzado a esperar en una luz roja cuando, en la avenida que cruza, no circula ningún auto. Es decir, si un automóvil llega a un cruce con semáforo en luz roja, la luz puede cambiar inmediatamente a verde si es que las condiciones de la intersección lo permiten. Durante esta implementación, se descubrió que se redujo en gran medida la cantidad de vehículos que cruzan indebidamente una luz roja. Se calculó que menos del 1% de los vehículos cruzan dicha luz en esta ciudad, mientras que en otras ciudades de Holanda la cifra supera el 2%. Además, también se calculó que se evitarían atascos de entre 300 y 350 metros de coches, en solo una hora (De Haro, 2016).
- Diario El Universal (Martelo, 2016) resalta otro ejemplo importante de la implementación exitosa de semáforos inteligentes. Esta se dio en la ciudad de Cartagena, Colombia, que cuenta con una red de semáforos inteligentes, con cámaras detectoras que indican la cantidad de vehículos que circulan por las intersecciones, controlando así la duración de las luces del mismo. Además, los semáforos cuentan con una programación especial para horas pico, para agilizar el tránsito en las avenidas más afectas en dicho horario.
- En la ciudad de Barcelona, España, se implantarán semáforos inteligentes con el objetivo de regular y reducir el tráfico y apoyar a vehículos de emergencia como ambulancia, policías, bomberos, etc. En caso de que el semáforo tenga encendida la luz roja, y se aproxime un vehículo de emergencia, el semáforo automáticamente cambiará a luz verde para permitir el paso de los vehículos que se encuentran obstruyendo el paso del vehículo de emergencia (Álvarez, 2014).
- Diario El Nuevo Herald (Chardy, 2016) señala un ejemplo más en otra ciudad norteamericana, la ciudad de Miami, en el estado de Florida. Los semáforos de esta ciudad son ahora controlados por un centro de comando con computadoras y pantallas en donde técnicos e ingenieros monitorean constantemente y controlan los mismos en caso de que se presente una grave congestión. Aproximadamente tres mil semáforos fueron innovados con esta tecnología.
- Diario El Nuevo Diario (Lara, 2015) menciona que, en la ciudad de Tokio, existe todo un edificio especializado para el monitoreo y control de semáforos, las 24 horas del día. Los semáforos inteligentes cuentan con

sensores y cámaras que se autorregulan en dependencia de la cantidad de vehículos y el tráfico en circulación. Además, se tiene un *software* especializado para el control de los mismos.

- En cuanto a la implementación de un algoritmo de sincronización de semáforos para lograr la ya mencionada “ola verde”, el periódico peruano Gestión señala que dicho algoritmo inteligente será aplicado en seis avenidas importantes de la ciudad de Lima, lo que podría reducir el tiempo de recorrido en ellas un 15% (Gestión, 2016d).

Todos estos proyectos han resultado exitosos. Muestran que se han implementado sistemas de semáforos inteligentes en diferentes ciudades del mundo, y que, en efecto, al realizar mediciones, se ha logrado disminuir el tiempo de traslado de los conductores cuando la implementación es realizada correctamente.

5.5. Semáforos inteligentes en la Ciudad de México.

Como se ha mencionado anteriormente, existen estudios que avalan que esta ciudad es la que se ve más afectada en todo el mundo por problemas de tránsito, lo cual afecta sin duda alguna la calidad de vida de todos sus ciudadanos. Por esta razón, la implementación de semáforos inteligentes en la ciudad parece ser una buena idea. Si bien no es posible eliminar el problema al 100%, puede que sea posible reducirlo en un porcentaje significativo, como ha sucedido en las ciudades descritas anteriormente.

Sin embargo, es importante resaltar un punto esencial. La Ciudad de México presenta diferencias significativas con el resto de las ciudades descritas, en las que los semáforos inteligentes han sido exitosos. Estas diferencias podrían provocar que dicho proyecto no sea exitoso. Las diferencias son las siguientes:

- Cuando el proyecto se ha aplicado en ciudades de similar tamaño a la Ciudad de México, en cuanto a población y extensión territorial, han sido ciudades totalmente desarrolladas, como Nueva York, Miami, Toronto y Tokio, las cuales cuentan con una mucha mejor organización arquitectónica y matricial, sin mencionar que cuentan con mejores posiciones económicas.
- Cuando se ha aplicado a ciudades en desarrollo como la Ciudad de México, han sido ciudades mucho más pequeñas ya sea en superficie, en población, o en ambas, como las ciudades Lima y Cartagena.
- Por último, se ha aplicado también en ciudades que son tanto desarrolladas, como pequeñas en cuanto a extensión y población, como la ciudad de Bucarest.

En la tabla 5.5.1 se resume lo mencionado anteriormente:

Tabla 5.5.1: comparación de ciudades con semáforos inteligentes.

Ciudad	Tipo	Superficie*	Población**	Resultado
Nueva York	Desarrollada	Muy grande	Muy grande	Reducción 25% en congestiones vehiculares.
Toronto	Desarrollada	Grande	Mediana	Reducción 40% tiempo de espera en semáforos.
Lima	En desarrollo	Muy grande	Mediana	Reducción 15% tiempo de recorridos en automóvil.
Bucarest	Desarrollada	Mediana	Pequeña	Reducción 28% en horas de espera por tráfico.
Cartagena	En desarrollo	Mediana	Pequeña	Reducción 20% en horas de espera por tráfico.
Pittsburgh	Desarrollada	Pequeña	Pequeña	Reducción 40% en congestionamientos vehiculares.
México	En desarrollo	Muy grande	Muy grande	?

Escala de superficies *				
Muy grande	Mayor a	1,200		km ²
Grande	Entre	600	1,200	km ²
Mediana	Entre	200	600	km ²
Pequeña	Menor a	200		km ²
Escala de poblaciones **				
Muy grande	Mayor a	15,000,000		habitantes
Grande	Entre	8,000,000	15,000,000	habitantes
Mediana	Entre	3,000,000	8,000,000	habitantes
Pequeña	Menor a	3,000,000		habitantes

El hecho de implementar un sistema inteligente de programación de semáforos en una ciudad como la Ciudad de México, en desarrollo, mal organizada y enorme en cuanto a extensión geográfica y población se refiere, sería algo nuevo, no experimentado en ninguna de las ciudades anteriores, por lo que no se garantiza la obtención de resultados positivos en esta ciudad.

Por esta razón, se realizará una experimentación por simulación en computadora que permita comparar un antes y un después del tránsito con semáforos inteligentes en la ciudad, y comprobar numéricamente si hubo o no una mejora sustancial.

Todo esto surgido de la necesidad de disminuir el tiempo de traslado en automóvil en la Ciudad de México, que se ha demostrado que es el más pesado y tardado del mundo. Además, esta necesidad va acompañada con la necesidad de disminuir el estrés que las personas experimentan cuando conducen bajo severas condiciones de tránsito, así como la necesidad de disminuir los niveles de contaminación ambiental que presenta la ciudad. El resultado principal a medir será el del tiempo de traslado, pero sin duda el disminuirlo ayudaría a disminuir el impacto de los demás problemas.

6. DESARROLLO.

Como se ha expuesto en la sección anterior de este escrito, existe un grave problema de tráfico vehicular en las calles de la Ciudad de México. La velocidad promedio a la que circulan los automóviles por las calles de la ciudad, en un día laboral normal, es baja, y ha ido disminuyendo aproximadamente 1.38 kilómetros por hora al año desde 1990. Esto lo muestra la figura 6.1, de acuerdo al Instituto Mexicano para la Competitividad (Tarriba y Alarcón, 2012):

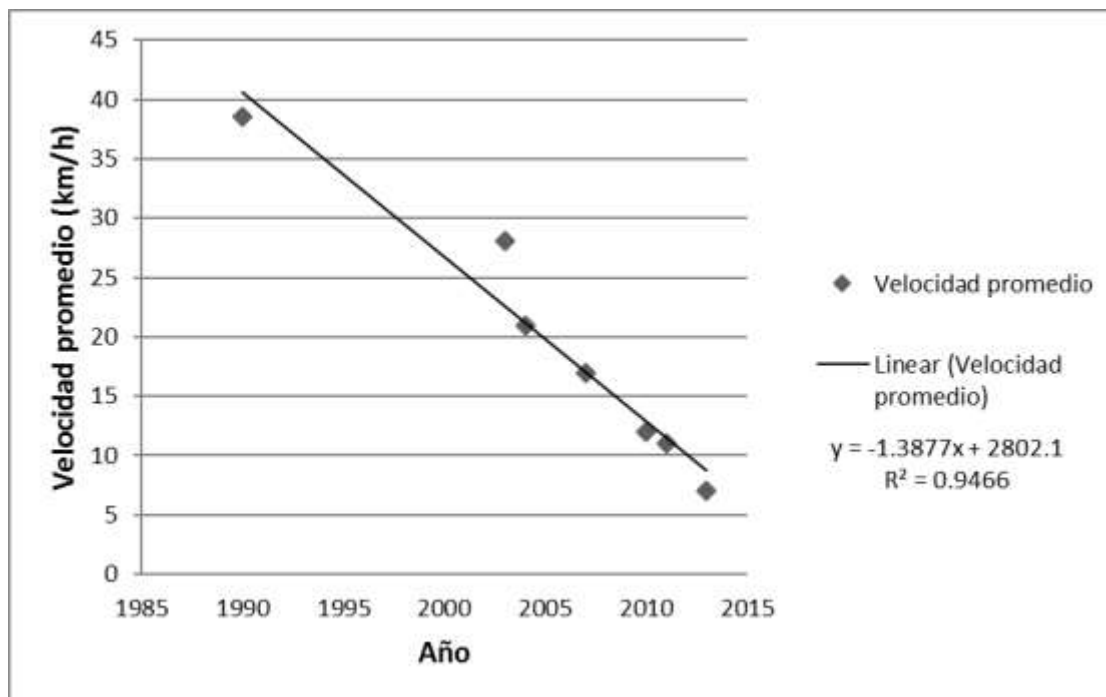


Figura 6.1: velocidad promedio de automóviles en la Ciudad de México con el paso de los años.

La figura 6.1 muestra que existe una relación negativa entre el paso de los años y la velocidad promedio de traslado. Esto quiere decir que esta última disminuirá aún más cada año que transcurre, si es que las condiciones de tránsito se mantienen siempre iguales.

El valor R^2 mostrado en la misma figura indica la correlación entre variables. Un valor de 0.9306 podría ser considerado como una correlación elevada, (al ser el valor uno una correlación perfecta entre variables). Cabe mencionar que la línea de tendencia mostrada nunca llegará a tocar el cero en el eje horizontal. Mientras las condiciones de tránsito sean iguales, ésta disminuirá ya que seguirá existiendo disminución de velocidad promedio en la Ciudad de México debido al incremento poblacional y vehicular. Disminuirá hasta llegar a un valor demasiado pequeño, no tocará el cero, y se estabilizará.

Se ha realizado una experimentación para tratar de demostrar la veracidad de las velocidades investigadas. Se realizaron en un periodo de tres meses cuatro viajes en automóvil en horas pico (entre 7 y 10 de la mañana) a cuatro destinos diferentes dentro de la Ciudad de México, y se midieron las velocidades promedio en kilómetros por hora. Para fines prácticos, la tabla 6.2 detalla las velocidades y cálculos del primer destino (Santa Fe, partiendo de la Colonia del Valle. Aproximadamente 16 kilómetros de distancia):

Tabla 6.2 muestra de velocidades promedio en días comunes en la Ciudad de México, entre las 7 y 10 de la mañana.

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
Velocidad promedio (km/h)	12.00	11.25	13.85	9.80

Estos resultados son un poco mayores a los datos obtenidos mediante investigación. Esto se debe a que se ha medido la velocidad promedio de un solo automóvil, en comparación de la velocidad promedio de los millones de autos que circulan todos los días por las calles de la ciudad. Se ha considerado solo una muestra y no toda la población. Sin embargo, las velocidades no dejan de ser pequeñas.

Dichas mediciones nos arrojan una media de 11.73 kilómetros por hora, y una desviación estándar de 1.68 kilómetros por hora.

Con todos estos valores, es posible determinar los límites inferiores y superiores de la media mencionada anteriormente. Se seleccionará un intervalo de confianza de 95%, y el cálculo sería el siguiente:

$$L = \bar{x} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 11.73 \frac{km}{h} \pm 3.182 \left(\frac{1.68 \frac{km}{h}}{\sqrt{4}} \right) = 11.73 \frac{km}{h} \pm 2.67 \frac{km}{h}$$

En donde "L" es el límite tanto inferior como superior de la media, " \bar{x} " es la media de las velocidades, " σ " es la desviación estándar, "n" es el tamaño de la muestra y "t" es un valor estadístico obtenido de la tabla de distribución "t de Student" para el intervalo de confianza mencionado anteriormente y una muestra con tres grados de libertad (calculados como " $n - 1$ "). Dicha distribución es "sumamente importante para la estimación y el contraste de hipótesis sobre la media de una población" (Cardiel et al, 2011).

De lo anterior, se concluye que, según la experimentación realizada, en un día laboral normal en la Ciudad de México, la velocidad promedio de traslado en automóvil en horas pico es de 11.73 kilómetros por hora, con un límite superior de 14.40 kilómetros por hora, y un límite inferior de 9.06 kilómetros por hora, con el intervalo de confianza mencionado anteriormente y con una distancia de recorrido de 16 kilómetros.

La tabla 6.3 muestra las mediciones en kilómetros por hora para los cuatro destinos mencionados anteriormente. Ésta incluye los resultados de los cálculos de media, desviación estándar y límite inferior y límite superior de la media (partiendo desde la Colonia del Valle para todos los destinos, y tomando en cuenta un intervalo de confianza de 95% para todos ellos):

Tabla 6.3: muestra de velocidades promedio en automóvil en días comunes en la Ciudad de México para cuatro destinos diferentes.

Destino	Día 1 (km/h)	Día 2 (km/h)	Día 3 (km/h)	Día 4 (km/h)	Media (km/h)	Desviación (km/h)	L. inferior (km/h)	L. superior (km/h)
Estadio Azul	12.75	9.15	13.25	8.15	10.83	2.55	7.28	14.37
Cd. Universitaria	8.00	10.55	12.50	12.75	10.95	2.20	7.90	14.00
Polanco	12.25	8.25	13.00	10.35	10.96	2.12	8.01	13.91
Santa Fe	12.00	11.25	13.85	9.80	11.73	1.69	9.39	14.06

De la tabla 6.3, es posible concluir que la velocidad promedio en automóvil en la Ciudad de México varía entre diez y doce kilómetros por hora, con límites entre siete y catorce kilómetros por hora, dependiendo de la distancia a recorrer. La figura 6.4 muestra una comparación entre los límites superiores e inferiores de las medias, para cada una de las distancias analizadas:

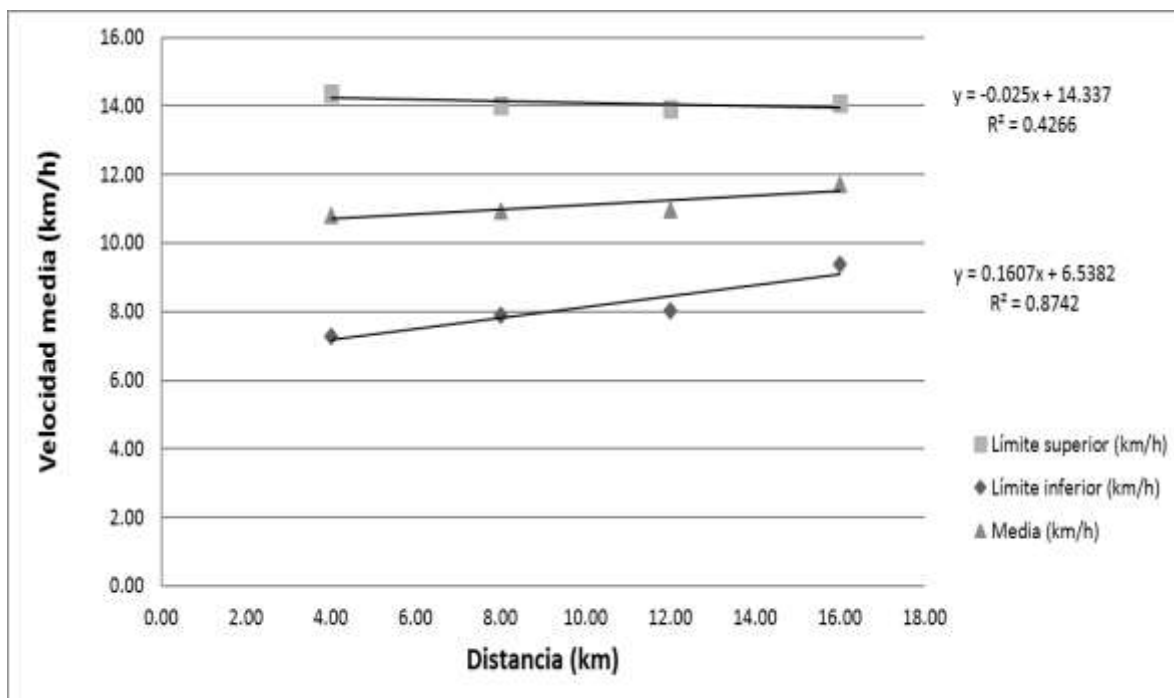


Figura 6.4: comparación del límite inferior y superior de la velocidad promedio en automóvil en la Ciudad de México.

La figura 6.4 permite observar con mayor facilidad los límites inferiores y superiores para las distancias estudiadas. Nuevamente, se ha colocado una curva lineal para

simular el comportamiento de los valores, lo que nos ha arrojado una ecuación para cada límite, la cual nos permite calcular los mismos de manera veloz para alguna distancia en específico. Una vez más, se muestra la correlación de los valores, la cual salió mucho más cercana a un valor uno para el límite inferior que para el límite superior. Sin embargo, esto no quiere decir que los valores del límite superior no sean representativos. De hecho, tiene sentido que, tanto para el límite inferior como para el superior, la línea de tendencia es casi horizontal, lo que implicaría que la velocidad promedio no debería variar con un cambio de distancia a recorrer. Por otro lado, los valores de velocidad media, para cualquier distancia a recorrer, en ocasiones subirán, y en otras bajarán, pero siempre estarán dentro de un rango establecido siempre y cuando las condiciones de la experimentación sean siempre las mismas (es decir, excesivo tráfico y desorden).

Estas mediciones y las ecuaciones arrojadas pueden ser de mucha utilidad, ya que, si se quisiera saber el límite superior o inferior de la media de la velocidad en la Ciudad de México, para una distancia de "x" kilómetros, con solo sustituir dicho valor en la ecuación de los límites se obtendría el valor buscado para la distancia en cuestión.

Ahora, hablando de la distancia promedio que recorre un automovilista en la Ciudad de México en un día laboral normal, el periódico *Fuero* señala que dicha distancia es de kilómetros y se refiere a la distancia casa – trabajo (*Fuero*, 2016b).

Obteniendo entonces los límites superior e inferior de la media de la velocidad para una distancia de 9.9 kilómetros, se sustituirá dicho valor en ambas ecuaciones, comenzando por el límite superior:

$$\text{Lím sup} = -0.0386 (9.9\text{km}) + 14.907 = 14.52 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Seguido por el límite inferior:

$$\text{Lím inf} = 0.1742 (9.9\text{km}) + 5.9679 = 7.69 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Es decir, para recorrer una distancia promedio de 9.9 kilómetros, la media de la velocidad en las condiciones de intenso tráfico en la Ciudad de México se situará entre los 7.69 y los 14.52 kilómetros por hora. Por motivos de practicidad, se supondrá una velocidad media de 11.1 kilómetros por hora, lo que equivale al promedio de los dos números mencionados.

Con esto, es posible calcular el tiempo promedio de traslado de los habitantes de la ciudad en un recorrido casa - trabajo, de la siguiente manera:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{9.9\text{km}}{11.1 \frac{\text{km}}{\text{h}}} = 0.89\text{h} = 53.5\text{min}$$

En donde " t " es el tiempo de traslado, " d " es la distancia de traslado y " v " es la velocidad de traslado del automóvil.

Por lo tanto, los habitantes de la Ciudad de México que se trasladan en automóvil a sus trabajos, ocupan prácticamente una hora en traslado en un solo sentido, y prácticamente dos horas en un viaje redondo. Todo esto para recorrer menos de 20 kilómetros de distancia.

Un tiempo tan grande de recorrido para una distancia tan corta, es provocado por el problema de excesivo tráfico vehicular en las calles. Un tiempo de recorrido de una hora para recorrer tan solo diez kilómetros de distancia indica que existe bastante rango de mejora en el tiempo tomado, ya que en situaciones de tráfico mucho menos pesadas, el tiempo que se tomaría sería la mitad, inclusive menos.

Además, si escalamos el excesivo tiempo de traslado y lo multiplicamos por la cantidad de vehículos que circulan todos los días por las calles de la ciudad, el resultado es un gran número de horas perdidas en atascos de tráfico, así como de emisiones de gases contaminantes que podrían ser reducidos.

Por esta razón, y como se ha mencionado anteriormente, ha surgido la necesidad de demostrar si una solución a este problema es la instalación de semáforos inteligentes en las calles de la ciudad, que actúen en favor del tránsito vehicular.

En el siguiente capítulo, se describirá toda la metodología seguida para realizar la simulación por computadora del tránsito con semáforos inteligentes, y analizar si se llegaría con esto al resultado deseado.

7. METODOLOGÍA.

La experimentación será realizada con el método de diseño de experimentos (DOE, por sus siglas en inglés que significan Design of Experiments). Para esto, se seguirán los siguientes pasos:

- Selección de ruta vial a seguir que incluya avenidas con tráfico problemático en la Ciudad de México.
- Exploración física de la ruta para medir variables reales que alimenten a la simulación.
- Planteamiento del experimento a realizar utilizando la técnica de diseño de experimentos.
- Selección de *software* para realizar la simulación.
- Cálculo de confiabilidad de la simulación.
- Extracción y análisis de resultados para demostrar numéricamente si existe una mejora sustancial utilizando semáforos inteligentes.

7.1. Selección de ruta vial.

Se ha seleccionado una ruta de aproximadamente 2.65 km de distancia que incluye avenidas importantes y representativas de la ciudad que presentan graves problemas de tráfico durante horas pico (entre 7 y 10 de la mañana y entre 5 y 8 de la noche). Es posible afirmar que, si los semáforos inteligentes funcionan en una ruta como esta, funcionarán en muchas otras rutas cuyas condiciones de tránsito sean similares. Se ha dividido la ruta en cuatro tramos:

- **Tramo1 (Avenida Gabriel Mancera):** se analizará el tramo que va de avenida Félix Cuevas hasta la calle Pilares, aproximadamente 800 metros de distancia. En horas pico, se llegan a necesitar hasta 3 minutos para recorrer este tramo, lo que equivale a una velocidad promedio de 16 kilómetros por hora.
- **Tramo 2 (Calle Pilares):** se tomará el tramo que va de avenida Gabriel Mancera hasta avenida Universidad, aproximadamente 650 metros de distancia. En horas pico se llegan a necesitar hasta 6 minutos para ser recorrido, lo que equivale a una velocidad de traslado de 6.5 kilómetros por hora.
- **Tramo 3 (Avenida Universidad):** se analizará el tramo que va de calle Pilares hasta avenida Félix Cuevas, aproximadamente 850 metros de distancia. En horas pico, se llegan a necesitar 4 minutos para ser

7.2. Exploración física de la ruta.

Con la finalidad de obtener resultados más precisos de las simulaciones, se realizaron tres recorridos completos de la ruta seleccionada (en tres días distintos, los tres en hora pico) para medir variables reales con las cuales alimentar la simulación. Las variables medidas fueron la duración de las luces de los semáforos, la cantidad de autos por minuto que circulan por cada intersección del sistema, y el largo de las avenidas.

La tabla 7.2.1 muestra los promedios de los valores medidos para la duración de las luces de los semáforos del sistema. Cabe mencionar que los semáforos uno y dos pertenecen a las dos calles de una misma intersección, lo mismo para el tres y cuatro, lo mismo para el cinco y seis, y así sucesivamente.

Tabla 7.2.1: duración real de las luces de cada semáforo del sistema.

Semáforo	Intersección	Duración siga convencional (seg)	Duración alto convencional (seg)
1	Mancera-Lorenzo 1	90	65
2	Mancera-Lorenzo 2	65	90
3	Mancera-Laurent 1	70	60
4	Mancera-Laurent 2	60	70
5	Mancera-Pilares 1	70	70
6	Mancera-Pilares 2	70	70
7	Pilares-Nicolás 1	60	60
8	Pilares-Nicolás 2	60	60
9	Pilares-Heriberto 1	65	50
10	Pilares-Heriberto 2	50	65
11	Pilares-Universidad 1	90	60
12	Pilares-Universidad 2	60	90
13	Universidad-Laurent 1	70	70
14	Universidad-Laurent 2	70	70
15	Universidad-Lorenzo 1	90	60
16	Universidad-Lorenzo 2	60	90
17	Universidad-Félix 1	70	75
18	Universidad-Félix 2	75	70
19	Félix-Nicolás 1	90	55
20	Félix-Nicolás 2	55	90

Por otro lado, la tabla 7.2.2 muestra el promedio y la desviación estándar de los valores medidos para autos que transitan por minuto por cada una de las intersecciones del sistema. Al igual que en la tabla anterior, los semáforos uno y dos pertenecen a las dos calles de una misma intersección, lo mismo para el tres y cuatro, y así sucesivamente.

Tabla 7.2.2: autos por minuto reales que circulan por cada intersección del sistema.

Semáforo	Intersección	Autos / min	Desv. Est.
1	Mancera-Lorenzo_1	67	3.56
2	Mancera-Lorenzo_2	8	1.25
3	Mancera-Laurent_1	66	3.27
4	Mancera-Laurent_2	8	2.62
5	Mancera-Pilares_1	42	2.36
6	Mancera-Pilares_2	10	0.00
7	Pilares-Nicolás_1	43	0.82
8	Pilares-Nicolás_2	6	1.89
9	Pilares-Heriberto_1	40	1.89
10	Pilares-Heriberto_2	7	1.70
11	Pilares-Universidad_1	76	1.41
12	Pilares-Universidad_2	7	0.82
13	Universidad-Laurent_1	75	2.05
14	Universidad-Laurent-2	6	1.70
15	Universidad-Lorenzo_1	76	0.82
16	Universidad-Lorenzo_2	5	0.00
17	Universidad-Félix_1	64	4.64
18	Universidad-Félix_2	9	2.05
19	Félix-Nicolás_1	65	2.45
20	Félix-Nicolás_2	6	0.82

Por último, en cuanto al largo de las avenidas, se representaron a escala los largos mencionados en la sección anterior.

El tener todas estas mediciones reales, y alimentar la simulación con ellos, garantiza la obtención de resultados más precisos.

7.3. Planteamiento del experimento.

El experimento se ha diseñado utilizando la técnica DOE. Dicha técnica se define como una herramienta estadística que consiste en determinar cuántas y cuáles pruebas se deben realizar para obtener datos que proporcionen evidencias objetivas, útiles para responder las interrogantes planteadas, y ser capaz de clarificar aspectos inciertos de un proceso, mejorar un proceso, o resolver un problema (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

El diseño realizado es el siguiente: se han establecido cuatro factores diferentes, que representan a cada uno de los tramos seleccionados. Además, se tienen dos niveles por factor, que representan las configuraciones que puede tener cada uno de ellos. La tabla 7.3.1 ilustra lo mencionado:

Tabla 7.3.1: diseño del experimento.

Factores	Nivel 1	Nivel 2
Tramo 1	Convencional	Inteligente
Tramo 2	Convencional	Inteligente
Tramo 3	Convencional	Inteligente
Tramo 4	Convencional	Inteligente

El resultado a medir será el tiempo promedio de traslado del vehículo para cada combinación posible. El hecho de contar con cuatro factores y dos niveles por factor, implica una cierta cantidad de combinaciones posibles a experimentar. Por ejemplo, se puede realizar la combinación tramo uno convencional, tramo dos inteligente, tramo tres convencional y tramo cuatro inteligente. O la combinación tramo uno convencional y tramo dos, tres y cuatro inteligente, y así sucesivamente. De hecho, el número total de experimentos posibles a realizar según el modelo planteado sería dos elevado a la cuarta potencia, es decir, dieciséis combinaciones posibles.

Se ha optado por experimentar las dieciséis posibles combinaciones. La experimentación se realizará mediante simulaciones en computadora, por lo que el hecho de hacer todas las combinaciones no representará tanto tiempo ni esfuerzo. Además, el hecho de realizar todas las combinaciones posibles garantiza resultados más confiables.

Todas las combinaciones se han numerado siguiendo una numeración binaria, en donde el dígito cero representa al semáforo convencional y el dígito uno representa al semáforo inteligente. Es decir, los tramos que tengan dígito cero tendrán semáforos convencionales, y los que tengan dígito uno tendrán semáforos inteligentes. La tabla 7.3.2 muestra dicha numeración:

Tabla 7.3.2: iteraciones posibles del experimento.

Iteración	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4
1	0	0	0	0
2	0	0	0	1
3	0	0	1	0
4	0	0	1	1
5	0	1	0	0
6	0	1	0	1
7	0	1	1	0
8	0	1	1	1
9	1	0	0	0
10	1	0	0	1
11	1	0	1	0
12	1	0	1	1
13	1	1	0	0
14	1	1	0	1
15	1	1	1	0
16	1	1	1	1

En cuanto a la lógica de los semáforos a utilizar, se describirá a continuación el método de programación con el cual contarán, en donde tanto el semáforo convencional como el semáforo inteligente cumplen con las características mencionadas de cada uno de ellos en la sección de antecedentes y estado de la cuestión:

- **Semáforo convencional:** la duración de las luces será constante. Se ha programado con un comando “Wait” (espera), el cual le ordena que cada luz espere cierto número de segundos, siempre el mismo número, antes de cambiar a la próxima luz. El semáforo no toma en cuenta las condiciones exteriores y no es capaz de tomar decisiones por sí mismo (Thonhofer et al, 2017). La figura 7.3.3 muestra un diagrama de flujo de la programación de dicho semáforo:

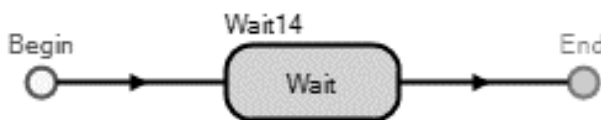


Figura 7.3.3: diagrama de flujo de la programación del semáforo convencional.

- **Semáforo inteligente:** la duración de las luces será variable. Se ha utilizado el comando “If” (si), para decidir en qué calle de la intersección hay más automóviles. Con base en esto, el semáforo decidirá darle paso a la calle que tiene más vehículos y cerrar el paso a la calle que tiene menos. Además, un comando “Wait” hace que el semáforo espere con la luz verde hasta que el número de autos de esa calle sea menor que el número de autos de la calle

que tiene la luz roja. Cuando se cumpla esta condición, los semáforos de la intersección cambiarán de color para ahora dejar pasar a los automóviles que estaban en espera y se acumularon. La figura 7.3.4 muestra un diagrama de flujo de la programación de dicho semáforo:

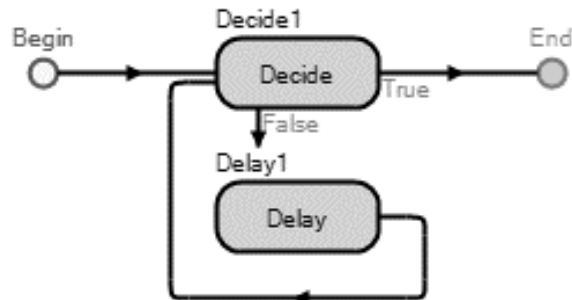


Figura 7.3.4: diagrama de flujo de la programación del semáforo inteligente.

7.4. Selección de *software* para realizar la simulación.

Se ha seleccionado el *software* “Simio®” (Simio, 2015c), programa especializado en simulación de procesos, para realizar la experimentación. Entre las principales ventajas y desventajas que tiene dicho programa con respecto al experimento en cuestión se encuentran las siguientes:

- **Ventajas:**

- ✓ Especializado al 100% en simulación de diferentes tipos de procesos.
- ✓ Es capaz de tomar decisiones durante la propia simulación con base en las condiciones que presente el sistema.
- ✓ Es posible alimentar fácilmente el sistema con entradas como la duración de la luz de los semáforos, la cantidad de autos que circulan por minuto y el largo de las avenidas.
- ✓ Arroja resultados en tablas fácilmente entendibles después de cada simulación.
- ✓ Presenta programación orientada a objetos que facilita la programación y evitan códigos pesados.
- ✓ Simulación estética que permite vistas bidimensionales y tridimensionales, así como seleccionar figuras representativas para las entidades y objetos (una entidad representa a un automóvil circulando).

- **Desventajas:**

- ✓ Representación de calles y avenidas utilizando únicamente un carril, ya que el representarlas con el número de carriles que presentan en la vida real complicaría de manera importante la programación y reduciría la estética de la simulación.
- ✓ No existe la posibilidad de representar filas de automóviles esperando en una luz roja, ya que estos se enciman en un solo espacio.

Todos el *software* similar presenta ventajas y desventajas. Se eligió “Simio®” debido a su especialización en simulación de procesos, facilidad de uso y programación, disponibilidad dentro de la misma Uninversidad Panamericana, interacción sencilla con el usuario e impresión de resultados fácilmente entendibles.

Cabe mencionar que, antes de haber seleccionado a Simio® como el programa a utilizar, se exploraron otras posibles opciones, las cuales se describen a continuación:

- “Sumo®”: *software* especializado en simulaciones de movilidad urbana. A diferencia de “Simio®”, éste presenta un enfoque más específico en movilidad urbana y no en toda clase de procesos. Sin embargo, no se eligió porque no presenta la opción de programar semáforos inteligentes, la interacción con el usuario es menos amigable y la simulación es menos estética.
- “Arena®”: este *software* es más similar a “Simio®”, ya que se enfoca en simulación de procesos en general, y el modo de programación es muy similar. Sin embargo, no se optó por esta opción ya que la simulación es menos estética y el programa no se encuentra disponible dentro de la Universidad Panamericana. Además, los agentes no pueden representarse con figuras representativas (en este caso automóviles moviéndose), sino siempre tienen forma de triángulo.

7.5. Cálculo de confiabilidad de la simulación.

Antes de comenzar formalmente con la experimentación, se realizó una simulación con semáforos convencionales, tratando de hacer que ésta sea lo más similar a la realidad, alimentando las variables de entrada mencionadas anteriormente. Esto se ha hecho para medir la similitud de la simulación con la realidad, para así saber qué tan confiable será la simulación. Para esto, se ha utilizado la técnica del error cuadrático medio (Pilar, 1992), que se refiere a un porcentaje que indica el promedio de la diferencia entre lo estimado y lo real, elevado al cuadrado. Es posible calcular dicho error de la siguiente manera:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2$$

En donde "E" es el error cuadrático medio, "n" es el número de semáforos presentes en la simulación, "X_i" es el número de autos que transitan por minuto por la intersección en la realidad y "Y_i" es el mismo número pero en la simulación. Se calculará dicho error con respecto a la cantidad de autos por minuto que transitan por cada una de las intersecciones del sistema, y se utilizó dicha técnica ya que se cuentan con los datos necesarios para su uso, así como por la facilidad de su cálculo.

La tabla 7.5.1 detalla las mediciones obtenidas de autos que transitan por minuto las intersecciones tanto reales como en la simulación:

Tabla 7.5.1: comparación de autos por minuto por semáforo entre realidad y simulación.

Semáforo	Intersección	Real Xi (autos/min)	Simulación Yi (autos/min)	(Xi - Yi) ²
1	Mancera-Lorenzo_1	67	66	1
2	Mancera-Lorenzo_2	8	7	1
3	Mancera-Laurent_1	66	66	0
4	Mancera-Laurent_2	8	8	0
5	Mancera-Pilares_1	42	41	1
6	Mancera-Pilares_2	10	10	0
7	Pilares-Nicolás_1	43	41	4
8	Pilares-Nicolás_2	6	6	0
9	Pilares-Heriberto_1	40	41	1
10	Pilares-Heriberto_2	7	6	1
11	Pilares-Universidad_1	76	76	0
12	Pilares-Universidad_2	7	7	0
13	Universidad-Laurent_1	75	76	1
14	Universidad-Laurent-2	6	5	1
15	Universidad-Lorenzo_1	76	76	0
16	Universidad-Lorenzo_2	5	4	1
17	Universidad-Félix_1	64	64	0
18	Universidad-Félix_2	9	7	4
19	Félix-Nicolás_1	65	64	1
20	Félix-Nicolás_2	6	6	0

Sustituyendo entonces los valores en la fórmula, se obtiene lo siguiente:

$$E = \frac{1}{20}(1 + 1 + 0 + 0 + 1 + 0 + 4 + 0 + 1 + 1 + 0 + 0 + 1 + 1 + 0 + 1 + 0 + 4 + 1 + 0)$$

$$E = \frac{1}{20}(17) = 0.85\%$$

Por lo tanto, tomando en cuenta la variable de autos por minuto que circulan por cada una de las intersecciones del sistema, se obtiene un error cuadrático medio de 0.85%, lo cual es un porcentaje de error aceptable. Cabe mencionar que tanto los valores reales como los valores de simulación fueron medidos tres veces cada uno, y lo expresado en la tabla 5 es el promedio de dichas mediciones.

Posterior a este paso, se comenzará con la experimentación formal al correr las simulaciones programadas, en donde se realizaron todas las combinaciones posibles de semáforos convencionales e inteligentes descritas anteriormente, para cada uno de los cuatro tramos que presenta el sistema.

El objetivo de este experimento es demostrar si el uso de semáforos inteligentes reduce el tiempo de traslado desde el inicio hasta el fin de la ruta, por lo que, si esto se cumple, se espera que los automóviles se trasladen más rápidamente en aquellas simulaciones en donde existan más semáforos inteligentes que convencionales, y más lentamente en aquellas simulaciones en donde existan más semáforos convencionales que inteligentes.

Al ser la ruta seleccionada una ruta con características típicas de las calles y avenidas de la Ciudad de México, se supondrá que los resultados obtenidos para la misma serían muy similares a los de otras rutas de la ciudad. Por lo tanto, si existe una disminución de tiempo de traslado con semáforos inteligentes en esta ruta, se lograría el mismo resultado para otras similares. Con esto, se demostraría que la instalación de semáforos inteligentes ayuda a resolver el problema de tráfico vehicular en la Ciudad de México. De lo contrario, se demostraría que no lo hace.

8. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS.

Se han corrido las dieciséis iteraciones en “Simio ®” por un periodo de dos horas (dos horas de simulación corresponden a aproximadamente 20 minutos en la vida real) y con las condiciones de tránsito en las avenidas y calles correspondientes a hora pico.

La figura 8.1 muestra una fotografía de una de las simulaciones corriendo:

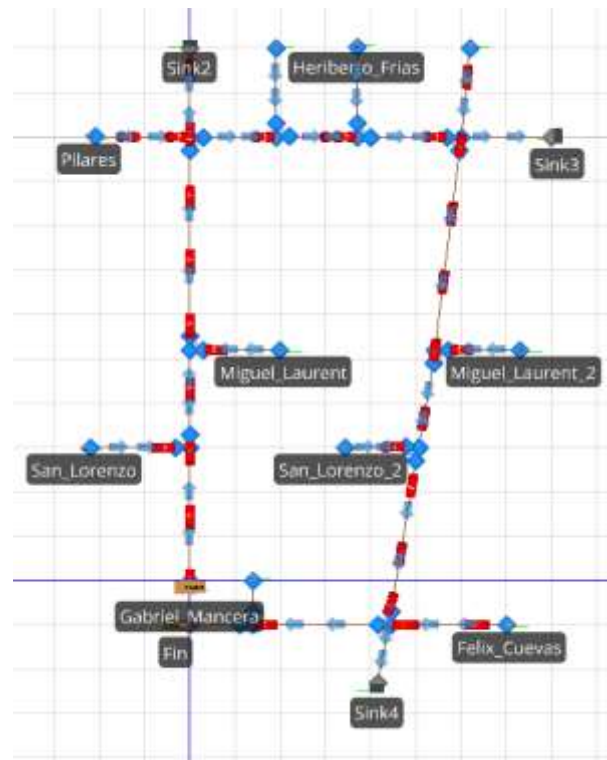


Figura 8.1: fotografía de una de las iteraciones simuladas durante la experimentación.

Se han recabado cuatro tablas (con cifras arrojadas directamente por “Simio ®” al terminar cada una de las simulaciones) que sintetizan los resultados más importantes y útiles para cumplir el objetivo planteado.

La tabla 8.2 muestra el tiempo promedio que cada entidad permanece en el sistema para cada una de las dieciséis iteraciones experimentadas:

Tabla 8.2: tiempo promedio que cada entidad permanece en el sistema para cada iteración.

Iteración	Código	Tiempo promedio de entidad en el sistema (seg)
1	0000	30.60
2	0001	28.80
3	0010	25.92
4	0011	25.56
5	0100	27.72
6	0101	28.08
7	0110	24.12
8	0111	23.40
9	1000	23.76
10	1001	24.12
11	1010	18.00
12	1011	17.64
13	1100	20.16
14	1101	20.52
15	1110	19.08
16	1111	17.28

La tabla 8.2 indica que existe una disminución en el tiempo promedio que cada entidad permanece en el sistema para las iteraciones que presentan más semáforos inteligentes que convencionales. De hecho, en la simulación con semáforos convencionales, cada entidad permanece en promedio 30.6 segundos en el sistema, mientras que, en la simulación con semáforos inteligentes, permanecen solo 17.28 segundos, logrando una disminución de más de 13 segundos por entidad.

Se pueden observar pocos números en los que no existe una reducción de tiempo al aumentar el número de semáforos inteligentes, como lo es de la iteración 9 (1000) a la iteración 10 (1001). La iteración 10 cuenta con más semáforos inteligentes, sin embargo, el tiempo promedio que permanece cada entidad en el sistema es mayor por casi medio segundo. Esto se da porque, el hecho de combinar semáforos inteligentes y convencionales en el sistema, llega a provocar la desincronización de las luces de los semáforos, comenzando todo en la unión de un tramo que tiene semáforos inteligentes con un tramo que tiene semáforos convencionales. Por esta razón se presenta este fenómeno, sin embargo, no se presenta en todas las simulaciones y en general el tiempo promedio sí disminuye con el aumento de semáforos inteligentes en el sistema.

Estos resultados se ilustran de manera más representativa en la figura 8.3, que muestra una gráfica del tiempo promedio calculado para cada iteración (las iteraciones fueron ordenadas de manera que van de menor a mayor cantidad de semáforos inteligentes).

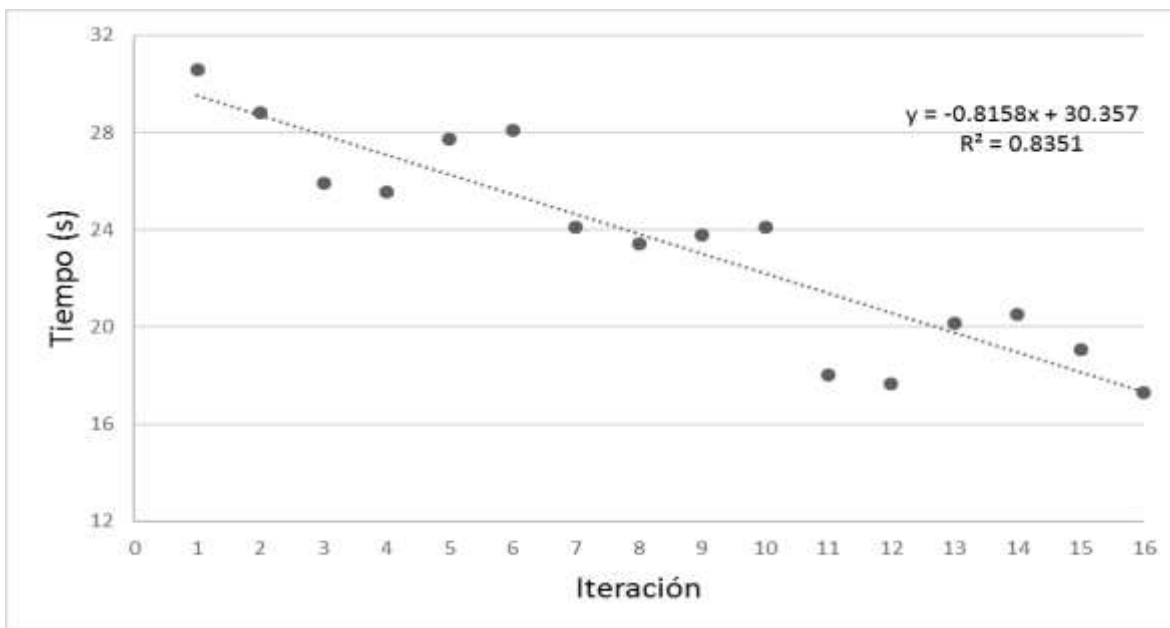


Figura 8.3: gráfica del tiempo promedio que cada entidad permanece en el sistema para cada iteración.

Como se observa en la gráfica, la tendencia indica que, a mayor número de semáforos inteligentes, el tiempo en que cada entidad permanece en el sistema será menor. Existen algunos picos en los que el tiempo aumenta, esto se da por el fenómeno explicado anteriormente, acerca de la desincronización de semáforos causada por la combinación de distintos tipos de semáforo. Sin embargo, los resultados no dejan de ser positivos, y esto lo muestra la línea de tendencia en la figura, que tiene pendiente negativa. Es decir, a mayor cantidad de semáforos inteligentes en el sistema, menor será el tiempo que cada entidad permanece en el mismo.

Además, la tabla 8.4 muestra el tiempo promedio que tarda cada entidad en transitar por cada uno de los tramos del sistema, cuando éstos cuentan con semáforos convencionales e inteligentes:

Tabla 8.4: comparación del tiempo promedio que cada entidad tarda en recorrer cada uno de los tramos del sistema, con semáforos convencionales e inteligentes.

Tramo	Tiempo convencional (seg)	Tiempo inteligente (seg)	Diferencia (seg)
1	590.04	320.40	269.64
2	1,099.08	381.60	717.48
3	455.76	265.68	190.08
4	142.20	116.64	25.56

Existe una disminución en el tiempo en que las entidades tardan en recorrer los tramos cuando éstos presentan semáforos inteligentes, en comparación de cuando presentan semáforos convencionales.

Por lo tanto, según las tablas mostradas con resultados recabados directamente de las simulaciones, los datos parecen indicar que los semáforos inteligentes sí ayudan a disminuir el tiempo de traslado de los automóviles en el sistema. El tiempo que cada entidad tarda en recorrer cada tramo es menor con semáforos inteligentes, y se obtuvo el mismo resultado para el tiempo promedio que cada entidad permanece en el sistema para las simulaciones que cuentan con más semáforos inteligentes que convencionales.

Hablando de nuevo de los más de trece segundos de ganancia utilizando semáforos inteligentes, esta reducción se dio en un tramo de 2.65 kilómetros de longitud.

Como se mencionó en la sección de desarrollo de esta investigación, la distancia promedio que un habitante de la Ciudad de México recorre para ir a trabajar son 9.9 kilómetros. Para fines prácticos, se redondeará que dicha distancia es cuatro veces mayor a la distancia total del sistema estudiado, lo que quiere decir que, al recorrer este tramo con semáforos inteligentes, los conductores reducirán su tiempo de traslado en 52 segundos en la ida, y otros 52 segundos de regreso, es decir, un total de 104 segundos al día.

Este resultado se puede interpretar de dos maneras distintas:

1. Si se analiza de manera individual, el hecho de reducir 104 segundos el tiempo de traslado en automóvil en un día, no causaría gran diferencia en la vida de las personas. Como se calculó en la sección de desarrollo de esta investigación, el tiempo que las personas tardan en llegar y regresar de sus trabajos es de 53.5 minutos (107 minutos viaje redondo) con las condiciones de tránsito actuales. Implementando los semáforos inteligentes, el tiempo se reduciría a 52.63 minutos (105.26 minutos viaje redondo), lo cual representa una ganancia de menos de dos minutos diarios en el viaje redondo de las personas. Esto representa una mejora de aproximadamente 1.6%.
2. Si se analiza de manera colectiva, los resultados son más atractivos y positivos. Como se mencionó en la introducción de este escrito, en la Ciudad de México circulan diario aproximadamente 5.7 millones de automóviles. Suponiendo entonces que cada una de estos vehículos reduce su tiempo de traslado casa-trabajo y trabajo-casa en 104 segundos, esto equivale a 592.8 millones de segundos menos de tránsito vehicular al día. Esto equivale a casi 10 millones de minutos o casi 165 mil horas diarias. En un año (suponiendo un año con 250 días hábiles), se reducirían 42 millones de horas de tránsito vehicular, lo cual tendrá sus repercusiones positivas en una gran disminución de contaminación ambiental, y esto gracias a la implementación de semáforos inteligentes.

Por otro lado, se recabaron otros resultados de las simulaciones que pueden explicar este comportamiento. Son útiles para entender de mejor manera las diferencias en las simulaciones entre ambos tipos de semáforo, y el porqué de la ayuda de los semáforos inteligente. Esto lo muestra la tabla 8.5:

Tabla 8.5: tiempo que dura el alto y el siga en cada semáforo del sistema, en modo convencional y en modo inteligente.

Semáforo	Duración siga convencional (seg)	Duración alto convencional (seg)	Duración siga inteligente (seg)	Duración alto inteligente (seg)
1	90	65	75	30
2	65	90	30	75
3	70	60	70	30
4	60	70	30	70
5	70	70	65	40
6	70	70	40	65
7	60	60	75	35
8	60	60	35	75
9	65	50	80	35
10	50	65	35	80
11	90	60	65	45
12	60	90	45	65
13	70	70	70	40
14	70	70	40	70
15	90	60	70	40
16	60	90	40	70
17	70	75	60	50
18	75	70	50	60
19	90	55	70	35
20	55	90	35	70

La tabla 8.5 muestra la duración de la luz verde y roja para cada semáforo del sistema, tanto en su modo convencional como en su modo inteligente. Los semáforos impares controlan el tránsito de la avenida principal de la intersección, mientras que los semáforos pares hacen lo mismo para la calle secundaria de la misma intersección.

Analizando los números mostrados, es posible llegar a una posible razón por la que hayan salido resultados positivos con el uso de semáforos inteligentes. Se tomarán como ejemplo los semáforos número uno y dos para el análisis (controlan el tránsito de la primera intersección, avenida principal y calle secundaria respectivamente).

Como se muestra, el semáforo uno en su modo convencional prende la luz verde por 90 segundos y la luz roja por 65 segundos. Por otro lado, el semáforo dos, al ser su contraparte en la misma intersección, prende la luz verde 65 segundos y la luz roja 90 segundos. Queda claro que la avenida principal de la intersección tiene prioridad, al durar más tiempo la luz verde de su semáforo, y con una diferencia de 25 segundos entre la duración de la luz verde y la luz roja.

Ahora, el mismo semáforo en modo inteligente, prende la luz verde durante aproximadamente 75 segundos y la luz roja durante aproximadamente 30 segundos, con una diferencia entre ambas de 45 segundos. El tiempo que dura la luz verde en la avenida principal disminuyó 15 segundos, mientras que el tiempo que dura el alto de la misma disminuyó 35 segundos (lo mismo para el semáforo de la calle secundaria, pero en lugar de disminuir, aumentó). Es decir, la duración de ambas luces disminuyó, pero disminuyó en mayor medida la duración de la luz roja, lo que quiere decir que se le da aún más prioridad a la avenida principal de la intersección, la cual presenta mucho mayor tránsito que la calle secundaria.

El mismo caso sucede en los semáforos tres y cuatro, ya que para el semáforo tres, la duración de la luz verde disminuye cero segundos de modo convencional a modo inteligente, mientras que la duración de la luz roja disminuye 30 segundos. Una vez más, el semáforo inteligente da aún más prioridad al tránsito de la avenida principal. Este mismo fenómeno sucede en todas las intersecciones del sistema.

Por lo tanto, los datos recabados parecen indicar que, la clave para la optimización del tránsito vehicular en el sistema, es dar mayor prioridad al tránsito de avenidas principales que al de calles secundarias, lo cual es logrado con la aplicación de semáforos inteligentes que detectan una mayor cantidad de automóviles transitando en las primeras.

Por último, también podría ser motivo de análisis el decidir si, con los resultados obtenidos, valdría la pena instalar semáforos inteligentes en toda la ciudad, o solo en ciertas calles y avenidas que sean similares a las estudiadas en esta experimentación.

Para ejemplificar esto, la tabla 8.6 muestra la importancia que tiene cada uno de los tramos del sistema estudiado para disminuir el tiempo promedio que cada entidad permanece en el sistema:

Tabla 8.6: tiempo promedio que cada entidad permanece en el sistema con semáforos inteligentes solo en cada uno de los tramos.

Iteración	Tiempo promedio de entidad en el sistema (seg)
0000	30.60
1XXX	20.07
X1XX	22.55
XX1X	21.38
XXX1	23.18
1111	17.28

En esta tabla, los caracteres “X” indican que no importa si el tramo tenga semáforos convencionales o inteligentes. Se está haciendo énfasis en cada uno de los cuatro tramos por separado. Es decir, el tiempo mostrado para la opción “1XXX” fue calculado con el promedio de los tiempos de todas las iteraciones que tienen

semáforos inteligentes en el tramo uno, para determinar la importancia que tienen los semáforos inteligentes en dicho tramo, y así para el resto de los tramos.

Como se observa, al tener semáforos inteligentes en el tramo 1, el tiempo promedio de permanencia en el sistema de cada entidad es de 20.07 segundos. En el tramo dos es de 22.55 segundos. En el tramo tres es de 21.38 segundos y en el tramo cuatro es de 23.18 segundos. Se encuentran mejoras para los cuatro casos, siendo el tramo uno el que más beneficia al tránsito al tener semáforos inteligentes, y el tramo cuatro el que menos lo hace (lo cual tiene sentido ya que el tramo cuatro solo cuenta con un semáforo. Por otro lado, el tramo uno cuenta con tres semáforos y es una avenida más transitada).

Por lo tanto, de esta tabla se concluye que, instalando semáforos inteligentes en todo el sistema, se obtiene una reducción de trece segundos por vehículo, mientras que, instalando semáforos inteligentes en solo el primer tramo del sistema, se obtiene una disminución de diez segundos. Es decir, se alcanza casi el mismo resultado, utilizando menos semáforos inteligentes.

Con esto, se recomienda a las instancias gubernamentales correspondientes que, si deciden invertir en este proyecto, hagan un análisis de si es conveniente o no instalar los semáforos en toda la ciudad, o solo en aquellas calles y avenidas que presenten condiciones y características similares a las estudiadas en esta experimentación, que son principalmente las siguientes:

- Velocidad media de vehículos entre cinco y quince kilómetros por hora.
- Media de vehículos que transitan por minuto entre 60 y 80.
- Desviación estándar de vehículos que transitan por minuto entre cero y cinco.

CONCLUSIONES.

De la investigación, análisis y experimentación realizada, es posible extraer las siguientes conclusiones:

1. La Ciudad de México es una de las ciudades más afectadas en el mundo por tráfico vehicular. Existen estudios que avalan que los habitantes de dicha ciudad son los que pierden más horas al año atorados en tráfico en comparación con los habitantes de cualquier otra ciudad del mundo.
2. Durante la simulación realizada, el uso de semáforos inteligentes en el sistema estudiado logró disminuir el tiempo que cada entidad permanece en el sistema aproximadamente trece segundos. Es posible inferir que, si se logró esta mejora en el sistema, se logrará en muchas otras calles y avenidas de la Ciudad de México cuyas condiciones de tránsito sean similares.
3. Escalando los resultados obtenidos a una distancia de traslado de 9.9 kilómetros, la cual representa la distancia promedio que cada trabajador de la Ciudad de México recorre en automóvil para trasladarse de su casa a su trabajo, se obtiene una disminución en el tiempo de traslado de 52 segundos, o 104 segundos para el viaje redondo.
4. El hecho de reducir el tiempo de traslado por automóvil por día en 104 segundos, puede no representar un beneficio en cada persona, ya que, hablando de traslados relacionados con el trabajo, en lugar de estar en su coche un tiempo de 107 minutos diarios, lo estaría 105.26 minutos diarios, lo cual representa una ganancia aproximada de 1.6%. Esto parece ser una ganancia de tiempo diario poco representativa, y es un porcentaje bajo si lo comparamos con ciudades que llegan a tener beneficios de entre 20% y 40%.
5. Si escalamos este ahorro de 1.6% de tiempo diario por vehículo al total de vehículos que transitan diario por la Ciudad de México, los resultados pueden ser más representativos. Se obtendría un ahorro de 165 mil horas diarias de vehículos transitando, lo que podría tener reducciones importantes de tráfico, sin mencionar los beneficios que esto causaría al medio ambiente.
6. Si bien el cliente no quisiera instalar semáforos inteligentes en todo el sistema, se recomienda la instalación solo en el tramo uno, ya que es el que mayor beneficio le brinda al tráfico. Hablando de la Ciudad de México en su totalidad, se recomienda la instalación en aquellas calles y avenidas de la que presenten valores de velocidad, promedio y desviación estándar de autos por minuto entre los valores mencionados anteriormente.
7. Se recomienda el presente estudio a las instancias gubernamentales correspondientes para su análisis y posible aplicación de semáforos inteligentes en la Ciudad de México, o ciertas zonas de misma.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

Para complementar esta investigación, se recomienda la realización de los siguientes trabajos:

1. Desarrollo de una simulación de tránsito con semáforos inteligentes en un área más grande de la Ciudad de México, que abarque más calles y avenidas importantes, lo cual mejoraría la precisión de los resultados.
2. Análisis del impacto ambiental que generaría la implementación de semáforos inteligentes en la Ciudad de México.
3. Tomando en cuenta el impacto en tiempos de traslado y el impacto ambiental, realizar una investigación y análisis de costo – beneficio de la implementación de semáforos inteligentes en la Ciudad de México. Con los resultados obtenidos desde ambos puntos de vista, ¿vale la pena económicamente invertir en el proyecto?
4. Experimentación física del uso de semáforos inteligentes en la Ciudad de México.

REFERENCIAS.

Sin autor. (2015c). *Simio Reference Guide*. Version 8. Simio, pp. 1-815.

Arora Madhavi. Banga V.K. (2012). *Intelligent Traffic Light Control System using Morphological Edge Detection and Fuzzy Logic*. International Conference on Intelligent Computational Systems, p. 151.

Bellefleur, Olivier. (2012). *Urban Traffic Calming and Air Quality: Effects and Implications for Practice*. Institute National de Santé Publique, p. 1.

Calvert, S.C. Taale, H. Snelder, M. Hoogendoorn, S.P. (s.f.). *Improving traffic management through consideration of uncertainty and stochastics in traffic flow*. Volume 6, Issue 1. Case Studies on Transport Policy, pp. 81-93.

Cardiel, Nicolás. Gorgas, Jorge. Zamorano, Jaime. (2011). *Estadística básica para estudiantes de ciencias*. Universidad Complutense de Madrid, p. 98.

Daham, B. Andrews, G.E. Li, H. Partridge, M. Bell, M.C. Tate, J. (2005). *Quantifying the effects of traffic calming on emissions using on road measurements*. SAE Technical Paper, p.1620.

Fernández, Fernando. (2005). *Teoría de juegos: análisis matemático de conflictos*. Universidad de las Palmas de Gran Canaria, p. 1.

Gutiérrez, Humberto. De la Vara, Román. (2008) *Análisis y Diseño de Experimentos*. Ciudad de México, México. Editorial Mc Graw Hill. Capítulo 1, p. 4.

Jaller, Miguel. Sánchez, Sergio. Green, Joanne. Fandiño, Magdalena. (2016). *Quantifying the impacts of sustainable logistics measures in the Mexico City Metropolitan Area*. Volume 12. Procedia, pp. 613-626.

Jin, Junchen. Ma, Xiaoliang. Kosonen, Iisakki. (2017). *An intelligent control system for traffic lights with simulation based evaluation*. Volume 58. Control Engineering practice, pp. 24-33.

Leo, Alejandro. Morillón, David. Silva, Rodolfo. (2017). *Review and analysis of urban mobility strategies in Mexico*. Volume 5, Issue2. Case studies on transports Policy, pp. 299-305.

Martínez, Manuel. (2013). *Semáforos Inteligentes*. Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, pp. 2-8.

Morales, Rafael. González, Juan. (2013). *Control de tráfico vehicular por medio de semáforos inteligentes*. Universidad Rafael Urdeneta, p. 23.

Pilar, M. (1992). *Error cuadrático medio de predicción para modelos estructurales de series temporales*. Estadística española, pp. 117-135.

Tarriba, Gabriel. Alarcón, Gabriela. (2012). *Movilidad Competitiva en la zona metropolitana de la Ciudad de México: diagnóstico y soluciones factibles*. Instituto mexicano para la competitividad, p. 11.

Thonhofer, Elvira. Palau, Toni. Kuhn, Andreas. Jakubek, Stefan. Kozek, Martin. (2017). *Macroscopic traffic model for large scale urban traffic network design*. Volume 80. Simulation Modelling Practic, pp. 32-49.

Valencia, Víctor. (2000). *Principios sobre semáforos*. Universidad Nacional de Colombia, pp. 4-5.

Velasco, Erik. Retama, Armando. (2017). *Ozone's threat hits back Mexico City*. Volume 31. Sustainable Cities and Society, pp. 260-263.

Sin autor. (s.f.). *Semáforos*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, pp. 1-37.

Sin autor. (2012). *Densidad de población por delegación (habitantes por km²)*. INEGI, p. 1.

Sin autor. (2014). DECRETO POR EL QUE SE EXPIDE EL PROGRAMA HOY NO CIRCULA EN EL DISTRITO FEDERAL. *SEDEMA*, p. 4.

Sin autor. (2015a). Densidad. 2017, de *INEGI*. Recuperado de: <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/poblacion/densidad.aspx?tema=me&e=09>

Sin autor (2016a). Activación del programa para contingencias ambientales atmosféricas (PCAA) en la ZMVM contingencias (Fase I y Fase II). *SEDEMA*, pp. 1-3.

Sin autor. (2016e). Vehículos de motor registrados en circulación. 2017, de *INEGI*. Recuperado de: http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=

Bonilla, Armando. (2015). Ciduades más pobladas del mundo. 2017, de Conacyt. Recuperado de: <http://conacytprensa.mx/index.php/diez-mas/1606-ciudades-mas-pobladas-del-mundo>

Sin autor. (2015b). Descubre las 10 ciudades más extensas del mundo. 2017, de *Ciudades30*. Recuperado de: <http://ciudades30.com/tops/descubre-las-10-ciudades-mas-extensas-del-mundo/>

Sin autor. (2016b). Habitantes de CDMX tardan en promedio 88 minutos en llegar a su trabajo o escuela. 2017, de *Fuero*. Recuperado de: <http://www.fuero.com.mx/noticias-mexico-hoy/habitantes-de-cdmx-tardan-en-promedio-88-minutos-en-llegar-a-su-trabajo-o-escuela/>

Sin autor. (2016c). Los 6 motivos más fuertes para renunciar a tu trabajo. 2017, de *Mundo Ejecutivo*. Recuperado de: <http://mundoejecutivo.com.mx/management/2016/04/26/6-motivos-mas-fuertes-renunciar-tu-trabajo>

Sin autor. (2016d). Ola verde: seis avenidas importantes de Lima podrían reducir tiempo de recorrido en 15%. 2017, de *Gestión*. Recuperado de: <http://gestion.pe/politica/ola-verde-seis-avenidas-importantes-lima-podrian-reducir-tiempo-recorrido-15-2170619>

Alegret, Xavier. (2016). ¿Cuántos coches circulan por el mundo?. 2017, de *Economía Digital*. Recuperado de: https://www.economiadigital.es/politica-y-sociedad/cuantos-coches-circulan-por-el-mundo_182150_102.html

Álvarez, Rebeca. (2014). Barcelona implantará semáforos inteligentes. 2017, de Autobild.es Recuperado de: <https://www.autobild.es/noticias/barcelona-plantara-semaforos-inteligentes-237949>

Botin, Ricardo. (2014). Ya es posible sincronizar los semáforos de un modo inteligente para evitar los atascos. 2017, de Freno motor. Recuperado de: <https://frenomotor.com/tecnologia/sincronizar-semaforos-evitar-atascos>

Cachaldora, Cristina (2017). La historia del semáforo. 2017, de La Región. Recuperado de: <http://www.laregion.es/articulo/xornal-escolar/la-historia-del-semaforo/20170419143145702078.html>

Chardy, Alfonso. (2016). Los semáforos de Miami-Dade están adquiriendo inteligencia. 2017, de *El Nuevo Herald*. Recuperado de: <http://www.elnuevoherald.com/noticias/sur-de-la-florida/article68712732.html>

Chávez, Víctor. (2016). Perdemos 242 horas al año en la CDMX. 2017, de *El Financiero*. Recuperado de: <http://www.elfinanciero.com.mx/nacional/por-plantones-y-marchas-cada-capitalino-pierde-al-ano-242-horas.html>

Cuesta, Carlos. (2016). Semáforos controlados por inteligencia artificial. 2017, de *Autopista.es*. Recuperado de: <http://www.autopista.es/tecnologia/articulo/semaforos-controlados-inteligencia-artificial>

De Haro, Teresa. (2016). Semáforos inteligentes que reducen los tiempos de espera. 2017, de *Autopista.es*. Recuperado de: <http://www.autopista.es/tecnologia/articulo/semaforos-inteligentes-menos-tiempo-espera>

Lara, Rafael. (2015). Semáforos inteligentes a prueba de fuego. 2017, de *El Nuevo Diario*. Recuperado de: <http://www.elnuevodiario.com.ni/nacionales/managua/364112-semaforos-inteligentes-prueba-fuego/>

Martelo, Eleana. (2016). Los semáforos de Cartagena son más inteligentes de lo que usted piensa. 2017, de *El Universal*. Recuperado de: <http://www.eluniversal.com.co/cartagena/los-semaforos-de-cartagena-son-mas-inteligentes-de-lo-que-usted-piensa-226226>

Martínez, Yaiza. (2008). Semáforos inteligentes reducen la contaminación y agilizan el tráfico. 2017, de *Tendencias tecnológicas*. Recuperado de: http://www.tendencias21.net/Semaforos-inteligentes-reducen-la-contaminacion-y-agilizan-el-trafico_a2074.html

Resnick, Jim. (2015). Los semáforos que pueden acabar con la pesadilla del tráfico. 2017, de *BBC*. Recuperado de: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/04/150325_vert_fut_semaforos_inteligentes_sem_yv

Soler, Ricardo. (2014). Semáforos inteligentes para regular el tráfico en función de la demanda. 2017, de *Citroën*. Recuperado de: <http://blog.citroen.es/semaforos-inteligentes-para-regular-mejor-el-trafico-en-funcion-de-la-demanda/>