



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA, FACULTAD DE CIENCIAS POLÍTICAS Y  
FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL.**

**MAESTRÍA EN MOVILIDAD Y TRANSPORTE**

**Proyecto Terminal de Grado**

**SINCRONIZACIÓN DE SEMÁFOROS UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA EL  
CONTROL DEL FLUJO VEHICULAR EN LA CIUDAD DE TOLUCA.**

**Que para obtener el grado de Maestra en Movilidad y Transporte**

**Presenta**

**Ing. Guadalupe Rodríguez Camacho**

Dr. Germán García Benítez

Director de Tesis

Dr. Giorgio Mackenzie Cruz Martínez

Co- Director de Tesis

Tutores adjuntos

Dr. Javier Salas García

Dra. Patricia Liévanos Martínez

La Ciudad de Toluca cuenta con un sistema de semáforos de jurisdicción municipal, a cargo de la Dirección General de Seguridad con 269 intersecciones, de las cuales 162 operan de manera centralizada y 107 son intersecciones de tiempos fijos, en el segundo mencionado se presenta como situación que el personal operativo debe de sincronizar un semáforo a la vez, el presente plantea una solución para evitarlo.

Este trabajo, tiene como objetivo diseñar un modelo de sincronización para los semáforos de tiempo fijo que controlen el flujo vehicular, mediante el cambio de luces, empleando inteligencia artificial, para optimizar la operacionalidad en algunas intersecciones de la de la Ciudad de Toluca.

Para lograr dicho objetivo se describe un modelo, que utiliza los cálculos necesarios en alguna de las intersecciones que se encuentran en la red de semáforos de tiempo fijo utilizando el software de MATLAB para simular una sincronización, posteriormente enviarla a una tarjeta de radiofrecuencia, llamada LORA, esto mediante el uso del IDE de Arduino, permitiendo una conectividad hacia la siguiente intersección que realizará el cambio de luces, sin necesidad de hacerlo de manera manual, sino mediante la radiofrecuencia.

En conclusión, se identifica esta propuesta de solución factible para la Ciudad de Toluca, sin embargo, esto debe ser implementado en el controlador C-26 que es utilizado en el municipio, debido a que para fines de este trabajo no se consideró el controlador, únicamente se describen sus características, mismas indican que contienen GPS, el cual permite conectar una tarjeta inalámbrica externa (LORA), que permita llevar a cabo el procedimiento indicado en el presente.

# Índice

Resumen.....	2
Introducción.....	5
CAPÍTULO I MARCO METODOLÓGICO.....	7
1.1 Planteamiento del problema.....	7
1.2 Objetivo General .....	9
1.3 Objetivos Específicos .....	9
1.4 Hipótesis.....	10
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Estado del Arte.....	11
2.2 Concepto de semáforo .....	13
2.3 Historia del semáforo .....	14
2.4 Ventajas y desventajas de los semáforos .....	15
2.5 Clasificación y funciones de semáforos .....	16
2.6 Componentes físicos de los semáforos.....	20
2.7 Características en la operación de los dispositivos de señalización .....	21
2.8 Redes Neuronales.....	25
CAPÍTULO III MARCO CONTEXTUAL .....	32
3.1 Tiempos de semáforo.....	32
3.2 Cálculo de los tiempos del semáforo.....	33
3.3 Intersecciones en los semáforos .....	37
3.4 Sistema de semáforos en una ciudad .....	41
3.5 Sistema de semáforos utilizado en la ciudad de Toluca.....	41
CAPÍTULO IV DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....	46
4.1 Propuesta del cálculo de sincronización de semáforos en la Ciudad de Toluca .....	46
4.2 Utilizando Matlab en la sincronización de semáforos.....	47
4.3 Utilizando Arduino en la sincronización de semáforos .....	50

Conclusiones.....	57
Glosario.....	59
Índice de Figuras.....	60
Referencias.....	62
ANEXOS.....	65

## Introducción

---

A partir de la experiencia profesional en el área de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC's) se puede afirmar que han jugado un elemento relevante como herramienta de trabajo en diferentes áreas de estudio, esta ocasión será utilizada en semáforos de la Ciudad de Toluca y con ello lograr un beneficio para la ciudadanía y la movilidad permitiendo optimizar la logística existente.

Los semáforos son dispositivos eléctricos de señalización luminosa, que permiten regular la circulación de peatones y vehículos en vías públicas, cada uno de nosotros los utilizamos de manera cotidiana y tenemos el conocimiento que el color de la luz tiene un significado, recordando que son 3 colores diferentes.

Este trabajo tiene como finalidad el estudio del dispositivo para optimizar su funcionamiento, mediante el uso de inteligencia artificial para gestionar de manera inteligente su uso, siendo éste un aspecto transversal para las ciudades inteligentes (Smart Cities), beneficiando la solución de problemas, utilizando herramientas tecnológicas para conseguir que la infraestructura de una ciudad facilite la vida de todos los ciudadanos, esto aplicado a las intersecciones señalizadas con un semáforo.

El uso de las tecnologías permite recabar datos en tiempo real de los usuarios que hacen uso de un semáforo, utilizando sus vehículos y la infraestructura vial, esto permite una comunicación a través de Internet, para almacenarla y procesarla, interpretando una salida para intervenir en la toma de decisiones, así como controlar dispositivos automáticos de regulación del tráfico.

La ciudad de Toluca opera con semáforos centralizados y descentralizados en sus 269 intersecciones, datos obtenidos de la Dirección General de Seguridad, este trabajo hace una propuesta para la implementación de un prototipo con ayuda de la Inteligencia Artificial para dar solución al sistema descentralizado de intersecciones existentes. Con base en esto el objetivo de este trabajo es *formular un modelo de*

*sincronización para los semáforos de tiempo fijo que controlen el flujo vehicular, mediante el cambio de luces, empleando inteligencia artificial, para optimizar la operabilidad en algunas intersecciones de la Ciudad de Toluca.*

De esta manera, la hipótesis a demostrar es *la sincronización de semáforos de tiempo fijo, utilizando Inteligencia Artificial, optimizará el tiempo de manipulación de los dispositivos de señalización en la Ciudad de Toluca.*

Para alcanzar el objetivo, este trabajo cuenta con cuatro capítulos, el primero de ellos describe el marco metodológico, donde se enuncia el planteamiento del problema, el objetivo general, los objetivos específicos y la formulación de la hipótesis. Posteriormente se encuentra el capítulo dos, que contiene el marco teórico, contiene un estado del arte de manera concreta donde aborda los antecedentes que permitieron la elaboración de este trabajo, también contiene conceptos de manera general, así como la base teórica que sustenta el planteamiento del problema, para la solución del mismo. El capítulo tres hace referencia al marco contextual donde se define el sistema de semáforos en la ciudad de Toluca, así como la aplicación de ingeniería del tránsito para conocer los tiempos de semáforo correspondientes a las intersecciones seleccionadas para la realización del protocolo de investigación. El capítulo cuatro, es dedicado al diseño e implementación, se muestran resultados de la hipótesis planteada, y el procedimiento considerado para la realización del prototipo.

Finalmente se presentan las conclusiones de la investigación, un glosario y un apartado de anexos, mismos que pretenden dejar en claro las dudas o situaciones que ocurrieron en el mismo.

# CAPÍTULO I MARCO METODOLÓGICO

---

## 1.1 Planteamiento del problema

La Ciudad de Toluca, ocupa el quinto lugar como una de las ciudades más grandes del país y tiene arriba de dos millones de personas que habitan en ella, esto implica una gran carga urbana (Molina, 2014), cuenta con 135 localidades. Es uno de los 125 municipios, por su ubicación, es una ciudad estratégica para las actividades sociales y económicas del centro del país, a lo largo de la historia, la ciudad de Toluca cuenta con una evolución que está transformando de manera radical, contando con numerosas obras que permiten una actualización con un mayor número de servicios públicos, logrando agilizar la circulación vial y especialmente, contribuyendo a la solución de graves problemas ecológicos.

Una de las estrategias de movilidad para la zona metropolitana de Toluca es garantizar la accesibilidad, la calidad del servicio y el equilibrio financiero del sistema de transporte, reduciendo tiempos de traslado y gasto en transporte en 50% (Molina, 2014).

Lo anterior requiere de conocimientos de ingeniería del tránsito, que permitan optimizar la sincronización de la red de semáforos, en cuestión de movilidad, según los datos de la Dirección de Sustentabilidad Vial, refieren que existen 162 intersecciones semaforizadas, con unidades centralizadas, donde se programan las respectivas fases, basadas en ciclos y tiempos, dependiendo del volumen vehicular.

Un dato importante de mencionar es que la ciudad antes mencionada cuenta con un sistema semafórico conocido como centralizado, es decir está programado para ser operado según el número de vehículos, las horas donde existe un mayor índice de demanda; en ocasiones por falta de mantenimiento, ya que es costoso y puede llegar a presentar fallas permanentes se vuelve un caos, originando una congestión de vehículos de suma importancia.

Existen 107 intersecciones de tiempos fijos, mismas que utilizan un controlador de semáforos C-26, que son programados uno por uno, en caso de que exista algún fallo, se tiene que hacer el cambio en sitio. Para ello existe personal que hace rondines verificando el funcionamiento de esas intersecciones, también dar el mantenimiento correspondiente, desafortunadamente en este tipo de semáforos no se puede hacer una sincronización general, o poder trabajar con ellos en tiempo real, todo es de manera manual, cuando uno de los semáforos tiene una falla, debe ser reportada por el ciudadano para poder ser atendida, esto por no estar conectada a una central.

Este trabajo busca aportar una solución que permita la sincronización de los semáforos de tiempo fijo, que se encuentran en las intersecciones de Toluca, mediante el uso de dispositivos inalámbricos, esto pudiera ser considerado posteriormente en los controladores C26, sin embargo, aquí se describe de manera general el cómo pudiera ser implementado.

Parte del proyecto requirió hacer una entrevista con personal de la Dirección de Sustentabilidad Vial, quienes permitieron el acceso al sitio de trabajo, mostrando el manejo de los dispositivos de señalización desde el centro de control que opera en la Ciudad de Toluca, en el cual existe un control de manera ordenada y eficaz, pero la debilidad recae en aquellos semáforos que no se encuentran conectados a este centro de mando, razón por la cual se pretende hacer el uso de las tecnologías de la información y comunicación para crear una estrategia que converge en una solución posible que garantice una sincronización entre algunas de las intersecciones que utilizan el circuito C-26, buscando una mejora de los semáforos de tiempo fijo ya existentes, y con el uso de la Inteligencia Artificial controlar la sincronización de los mismos, permitiendo a los ciudadanos optimizar sus tiempos de traslado y tener una mejor afluencia vehicular; específicamente, para el personal que controla la sincronización de semáforos se busca que el procedimiento realizado actualmente sea sistematizado, evitando que tengan que realizar el procedimiento de manera manual.

Para lograr lo antes mencionado es fundamental comprender el funcionamiento del tráfico, con base en esto se utilizarán métodos matemáticos, teoría del tránsito e inteligencia artificial.

Los métodos matemáticos y la teoría de tránsito son utilizados para determinar los tiempos de semáforo referentes a los cambios de fase de color.

Dentro de la IA se consideran las redes neuronales, mismas que permitirán almacenar el comportamiento después de la etapa de entrenamiento, que genere salidas a eventos futuros esperados. De tal manera que utilizando esto, se pueda simular una situación en donde el semáforo tenga que tomar un color o tiempo de un ciclo dependiendo el tráfico vehicular.

## **1.2 Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo es:

*Formular un modelo de sincronización para los semáforos de tiempo fijo que controlen el flujo vehicular, mediante el cambio de luces, empleando inteligencia artificial, para optimizar la operacionalidad en algunas intersecciones de la Ciudad de Toluca.*

## **1.3 Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Analizar las intersecciones con semáforos de tiempos fijos de la Ciudad de Toluca, mediante investigación.
- Calcular los tiempos de semaforización mediante los conceptos de ingeniería de tránsito.
- Plantear una solución utilizando una tarjeta de radiofrecuencia para el paso de información correspondiente a los datos del cambio de luces en el tiempo establecido.

## 1.4 Hipótesis

Con base en el objetivo planteado, la hipótesis es:

*La sincronización de semáforos de tiempo fijo, utilizando Inteligencia Artificial, optimizará el tiempo de manipulación de los dispositivos de señalización en la Ciudad de Toluca.*

## CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 Estado del Arte

Actualmente el uso de la inteligencia artificial y el Internet Of Things (Internet de las cosas) han sido implementados en diferentes ámbitos: educativo, salud, búsqueda de información, marketing, transporte, casas, entre otros. Este trabajo presenta el impacto que ha tenido la inteligencia artificial en el área de transporte, específicamente en el uso de semáforos inteligentes; para ello, es importante conocer el estado del arte de este tema, mismo que es descrito en este apartado.

Samaniego-Calle et al (2019), realizaron un análisis en la zona centro de la ciudad de Loja, Ecuador, utilizando semáforos inteligentes, mediante el uso de la micro simulación incluyendo la red vial, para permitir la simulación de los semáforos se consideraron datos de semáforos del municipio, dando como resultado una reducción media en la contaminación por ruido (Samaniego Calle Víctor, 2019).

Dorantes –Flores et al (2022), por su parte, elaboraron una investigación tratando de crear un sistema autónomo para el monitoreo de un semáforo que permita controlar los tiempos de espera y continuidad de los cruces que colindan con el Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles, para contrarrestar el exceso de tráfico en horas pico, utilizando sensores y algoritmos que identificarán a los vehículos presentes para determinar el cambio de tiempos de luz en el semáforo. Se consideraron indicadores de tiempo de respuesta de los semáforos instalados y la factibilidad de los conductores para viajar por esta vía, teniendo como objetivo la fluidez vehicular, llegando a la conclusión que al ser implementado se redujo el tiempo de espera, permitiendo la creación de prototipos y beneficiando los equipos actuales.

Asimismo, Molina-Navarro et al (2016), llevaron a cabo un análisis que consiste en el aplazamiento que se origina por una inapropiada sincronización de los dispositivos de señalización en la ciudad de Veracruz. Dicha propuesta puede

decrementar costos de uso de gasolina y número de contaminantes del ecosistema (Molina Navarro & Zamora, 2016).

Por otro lado, Manzo-Cruz et al (2019) desarrollaron un sistema de semáforos inteligentes que permitió controlar el tránsito vehicular utilizando visión artificial, técnicas de procesamiento de imágenes y un lenguaje de programación como Python, permitiendo así disminuir problemas de zonas urbanas como el congestionamiento vial que aumentan la duración de los viajes (Manzo Cruz, 2019).

Salas Laureano et al (2022) propusieron la implementación de semáforos inteligentes con la finalidad de mejorar el tránsito de la Av. José Gálvez ubicada en la ciudad de Chimbote, Perú, atendiendo a la problemática de un aumento en el número de vehículos en los últimos años ocasionando un congestionamiento vial. Primero se realizó un diagnóstico de la situación en ese momento, después de obtener resultados se realizó el estudio de la implementación de un sistema de semaforización inteligente; con este estudio se concluyó que, en una de las principales intersecciones de la avenida estudiada, se encontró que la hora de mayor demanda es entre las 12:00 y 13:00 horas (Salas Laureano Martha Susana, 2021).

En 2022, Angúlo Movilla et al, desarrollaron un sistema autónomo que permite la regulación del tráfico, utilizando un software que tiene el control de mando, regulado en tiempo real, por ende, lleva a cabo predicciones considerando el flujo vehicular de los datos de una semana anterior, permitiendo una determinación del cambio de luces del dispositivo de señalización. Las herramientas utilizadas que permitieron su implementación fueron lenguaje Python, FLASK (framework) y un PLC el cual fue el encargado de la parte del funcionamiento, logrando la interpretación del flujo vehicular y permitiendo un decremento de tráfico vehicular (Angúlo Movilla, 2022).

En el mismo año (2022), Moreno Roman, mencionó que utilizar la inteligencia artificial y técnicas de simulación con la finalidad de resolver problemas de redes viales, permite una configuración de señales evitando así efectos no deseados de una mala planificación de tránsito como lo son accidentes viales, colapsos y gran cantidad de tráfico (Moreno Román, 2022).

También en el 2022, Castro Quishpe, elaboró el prototipo de un semáforo inteligente, que cuenta con un apartado de detección de vehículos en tiempo real, esto para dar prioridad a la vía con un mayor número de autos que permite determinar el tiempo de cambio de luces. Lo anterior lo resolvió con el uso del lenguaje Python a través de la librería OpenCV y mediante el tratamiento de imágenes que se obtuvieron de una cámara que detecta el conteo, almacenando la información en una base de datos utilizando PostgreSQL (Castro Quishpe, 2022).

De igual manera, Guzmán Avendaño et al (2022), hicieron uso de redes neuronales implementadas en un simulador de tránsito en diferentes intersecciones que permite analizar el tráfico, tomando una decisión para saber cuánto va a durar el color verde, dando prioridad a las vías con mayor afluencia vehicular (Guzmán Avendaño, 2022)

Bosch Matas (2022), realizó un proyecto donde se encontró una solución del sistema de semáforos en Barcelona con el uso de nuevas tecnologías llevando a cabo prototipos utilizando software como Solidworks. Gracias a esto se obtuvo como resultado una valoración de la viabilidad para la implementación de su modelo, buscando una mejora en el prototipo a implementar (Bosch Matas, 2022)

Considerando estos antecedentes, es notable que hacer uso de la inteligencia artificial en los dispositivos de señalización son de gran relevancia para una mejora de flujo vehicular, razón por la cual este trabajo es llevado a cabo centrándose en la problemática que tiene el municipio de Toluca.

## **2.2 Concepto de semáforo**

Actualmente la palabra semáforo, denota un dispositivo que regula el tráfico vehicular, teniendo una regla base mediante tres señales luminosas: una roja; la cual obliga al conductor a detenerse, una amarilla; que es la transición entre el rojo y verde, es la señal preventiva y una señal de color verde que indica el flujo vehicular.

Según Cal y Mayor un semáforo es un dispositivo eléctrico, cuya función permite la regulación del tráfico de peatones y vehículos en las carreteras y vialidades,

utilizando luces de color verde, amarillo y rojo, con un significado cada uno, utilizando una unidad de control, misma que permiten un correcto funcionamiento (Rafael Cal y Mayor Reyes, 1994).

Otro concepto de semáforo es el que menciona Covenin, quien dice que el semáforo opera de manera eléctrica utilizando un controlador, comunicando una acción de tráfico, estos se localizan en intersecciones que permiten la regulación de la fluidez de peatones y vehículos en carreteras y calles de uso común (Covenin, 1999).

Otro concepto importante que se menciona es el del semáforo inteligente: es todo aquello que es apto para la toma de decisiones, que funcionan mediante estados de entrada (velocidad, velocidad media, flujo de automóviles, etc), es decir el comportamiento será de forma mecánica (Anoroza, 2020).

Gracias a la implementación de este tipo de semáforos se llega a la solución de problemas de tráfico típicos como: congestión vehicular, esperas innecesarias, tiempos excesivos de viaje, gasto de combustible y contaminación del medio ambiente, esto por mencionar algunos.

### **2.3 Historia del semáforo**

La idea del semáforo nació de las señales ferroviarias, a finales de 1860, cuando el tráfico de autos no era todavía un gran problema. En 1865, en Inglaterra el Ing. John Peake Knight, quien dedicó parte de su vida al modo de operación de ferrocarriles, se encargó de estructurar algunos sistemas de señales, que se utilizaron en la red de trenes, consideró que usar señales en la calle podría ayudar a resolver el problema de las carretas que debido a que los peatones corrieran riesgo al atravesarse entre los caballos.

Dicho sistema contaba con dos brazos, mismos que indicaban la continuación o la permanencia de los vehículos, para esto se alzaban o descendía el brazo para indicar si correspondía avanzar o detenerse. Durante las noches era necesario utilizar lámparas de gas rojo y verde, esto permitía que existiera la visibilidad y así lograr estar atentos a las señales correspondientes.

En 1914, en Cleveland, se instala el primer semáforo, esto derivado a que el tráfico había incrementado éste operaba de manera manual con luces y desplegando las palabras “STOP” y “MOVE”. En 1924, en México se instalaron los primeros semáforos, para 1932 se pusieron en operación los primeros semáforos eléctricos de tiempos fijos, tiempo después se desarrollan semáforos con tiempos variables, después se construyeron redes de semáforos sincronizados (Gómez, 2020). La Figura 1 muestra el primer semáforo de la historia.



*Figura 1:* Primer semáforo de la historia en Barcelona. Fuente: (Permanyer, 1929).

Actualmente existen sistemas automatizados, que incluyen coordinación computarizada. Los colores que tienen los semáforos se deben a que se siguió el esquema de colores del sistema ferroviario, derivado de que puede ser identificado a larga distancia y cuenta con un gran espectro de visibilidad.

#### **2.4 Ventajas y desventajas de los semáforos**

Según Cal y Mayor y Cárdenas (1994) se pueden mencionar las siguientes ventajas y desventajas de los semáforos:

## **Ventajas**

- Ordena el desplazamiento del tráfico.
- Decrementa algunos accidentes de tránsito.
- Con espaciamientos favorables permite conservar la circulación continua a una misma velocidad.
- Interrumpir volúmenes de tráfico mayores de una arteria, permitiendo el paso de peatones y vehículos.
- Acción útil en zonas escolares.
- En la mayoría de los casos representan una opción más económica para el control del tránsito que otros controles: señales o policías de tránsito.

## **Desventajas**

- Incrementan el número de accidentes por alcance debido a los cambios sorpresivos de color.
- Ocasionan pérdidas innecesarias de tiempo.
- En caso de ser innecesario en una intersección producen un cuello de botella.
- Aumentan accidentes si no se encuentran funcionando de manera correcta.

## **2.5 Clasificación y funciones de semáforos**

Según Cal y Mayor (1994), los semáforos pueden ser clasificados con relación a su mecanismo de operación en los siguientes tipos: (Rafael Cal y Mayor Reyes, 1994).

### **Dispositivos que permiten controlar el tránsito vehicular**

- Dispositivos que no son accionados por el tráfico.
- Dispositivos que son accionados por el tráfico.

- Dispositivos que son totalmente accionados por el tráfico.
- Dispositivos que son parcialmente accionados por el tráfico.

### **Dispositivos que se utilizan para el control de paso peatonal**

- Dispositivos utilizados en zonas de alto índice peatonal.
- Dispositivos utilizados en zonas escolares.

### **Dispositivos utilizados en eventos especiales**

- Dispositivos de destello.
- Dispositivos que permiten la regulación para la utilización de carriles.
- Dispositivos implementados en puentes levadizos como mecanismo de protección.
- Dispositivos que cuentan con barreras que indican que se aproxima un tren.

Las luces que tienen los semáforos son de 3 colores, los cuales se describen a continuación:

**Rojo fijo:** Indica que el automovilista, debe detenerse, respetando la señal de la vía y para el peatón indica que debe esperar y detenerse para no cruzar.

**Amarillo fijo:** Advierte que el automovilista que está a punto de comenzar la luz roja, para el peatón indica que no disponen de tiempo suficiente para cruzar, evitando frenadas que puedan provocar accidentes.

**Verde fijo:** Indica que el automovilista puede continuar su camino o dar vuelta a la izquierda o derecha, el peatón puede pasar con los cuidados correspondientes.

**Rojo intermitente:** Destella el color rojo para indicar un alto obligatorio.

**Amarillo intermitente:** Destella una luz intermitente de color amarillo, indica un cruce con precaución para los conductores.

**Verde intermitente:** Destella una luz intermitente de color verde, indica que el tiempo de la luz verde se ha terminado.

Se menciona la clasificación de los semáforos de acuerdo con su forma de operación en: (Cal y Mayor Reyes, 1994).

### **Dispositivos de tiempo fijo**

Este tipo de semáforo es utilizado en las intersecciones, que según Cal y Mayor (1994), menciona que los estándares del tráfico son “relativamente estables a lo largo del día o en aquellas intersecciones en donde las variaciones vehiculares sean pequeñas, de tal forma que, estableciendo un programa de funcionamiento de semáforos fijo, no se produzcan demoras o congestionamiento severo”.

Generalmente en las intersecciones que se requiere la sincronización se utilizan los semáforos de tiempo fijo con los de una intersección próxima.

Según Cal y Mayor, alguna de las ventajas de los semáforos de tiempo fijo son las siguientes:

- No es necesario el uso de radares de tráfico, razón por la favorece el flujo vehicular.
- Se pueden instalar cajas de control en las intersecciones.
- Permiten una coordinación precisa con semáforos adyacentes.
- Genera un costo más reducido que de los dispositivos accionados por el tránsito.
- El mantenimiento es sencillo y práctico.

Según la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2014), define que un sistema de semáforos será programado siempre y cuando sea necesario para satisfacer las necesidades del tráfico. En caso de que existan eventos especiales como accidentes, congestión vial, manifestantes en algunas de las vías principales se pueden manejar los semáforos de forma manual, para que un semáforo sea programado es necesario crear un plan de tiempos, para ello es necesario realizar

aforos vehiculares, para obtener información verídica en los ciclos de tiempos y sincronización de semáforos (SCT, 2014)

A continuación, se mencionan algunos factores que son utilizados para la realización de la programación de un semáforo en las intersecciones (SCT, 2014):

- Total, de carriles y condiciones urbanas.
- Flujo del tráfico en los movimientos direccionales.
- El uso del transporte público y vehículos dedicados al comercio.
- El tiempo medido en segundos del paso de dos vehículos contiguos que utilizan la intersección.
- Utilización del peatón.
- Desalojo de la intersección a vehículos y personas, cuando se hace cambio de indicación.

### **Semáforos de tiempo variable**

Este tipo de semáforos se conocen como semáforos accionados por el tráfico, una característica es que las duraciones del ciclo que representa variaciones en el número de vehículos al transitar sobre las carreteras o cruceros, esto es registrado por dispositivos de detención que se encuentran conectados a una central.

Cuando uno o varios accesos de la intersección cuentan con detectores el tipo de control que tiene es semi- accionado. Otro caso es si se cuenta con detectores en cada uno de los accesos, se conoce como “control totalmente accionado”. Algunos tipos de detectores para registrar el paso de los vehículos se cuenta con: detectores de presión, magnéticos, de radar, de inducción.

Para poder instalar este tipo de semáforos se debe llevar a cabo un análisis, de los factores que intervienen tales como la cantidad de autos, el movimiento transversal, horas con mayor demanda, los peatones, accidentes viales, entre otros aspectos (Cal y Mayor Reyes, 1994).

Los dispositivos que son accionados por el tráfico tienen una clasificación como se menciona a continuación (SCT, 2014):

- a) Accionados Totalmente. Cuentan con medios que son accionados por el tránsito en todos los puntos de acceso de las intersecciones.
- b) Accionados Parcialmente. Cuentan con medios que son accionados por el tráfico en varios o solo un punto de acceso de las intersecciones.

Los semáforos aplican unos diferentes procedimientos sobre el flujo del tráfico, permitiendo seleccionar el uso del dispositivo para controlar las condiciones del tráfico, se detallan algunas funciones que tienen los semáforos: (Reyes Jarrín, 2019)

Interrupción periódica del tráfico de la circulación vehicular o de acceso peatonal, con la finalidad de dar paso a otra circulación.

- Moderar la velocidad de los automóviles, permitiendo una circulación constante a una velocidad continua.
- Examinar la circulación de las vías.
- Suprimir o decrementar el número de accidentes.
- Ordenamiento del tráfico y de la circulación.

## 2.6 Componentes físicos de los semáforos

A continuación, se mencionan los componentes físicos con los que cuenta un semáforo (SCT, 2014):

**Cabeza:** Pieza que contiene partes que son observables del dispositivo de señalización, cuenta con un número de caras que van en diferentes posiciones.

**Soporte:** Estructura utilizada para detener la cabeza de los dispositivos de señalización, para manejar ajustes de manera vertical y horizontal.

**Lente:** Es la parte de la unidad óptica que por refracción dirige la luz proveniente de la lámpara y de su reflector en la dirección deseada.

**Cara:** Las luces que conforman los dispositivos de señalización, pueden ser de dos o tres caras, como es de nuestro conocimiento las más utilizadas son las de tres.

**Placa de contraste:** Se utiliza para que exista una mayor visión del dispositivo de señalización, para evitar que otras luces puedan confundir al conductor vehicular.

**Visera:** Parte del dispositivo de señalización colocado alrededor de las unidades ópticas, como prevención de que la señal emitida por el dispositivo sea visible desde lugares diferentes donde se encuentra enfocado.

## **2.7 Características en la operación de los dispositivos de señalización**

Los dispositivos de señalización funcionan coordinadamente dentro de las intersecciones, ya que pueden conectarse mediante una central o también ser accionados con supervisión, es importante conocer la operabilidad de los mismos y sus componentes para que puedan ser estudiados.

Un controlador de semáforos permite la operación de las luces que son programadas por ingenieros asignados a cada cruce, es también llamado el cerebro de operaciones. Se cuenta con varios controladores de semáforos, los más utilizados en nuestros días son aquellos que funcionan sobre una base de microprocesadores, los cuales cuentan con un protocolo de comunicaciones.

Algunos operan basándose en microprocesadores de con capacidad de 8 bits, contando con un diseño por módulos que hace amigable la ejecución y el mantenimiento, los dispositivos electrónicos se encuentran diseñados para que utilicen un consumo de energía mínimo.

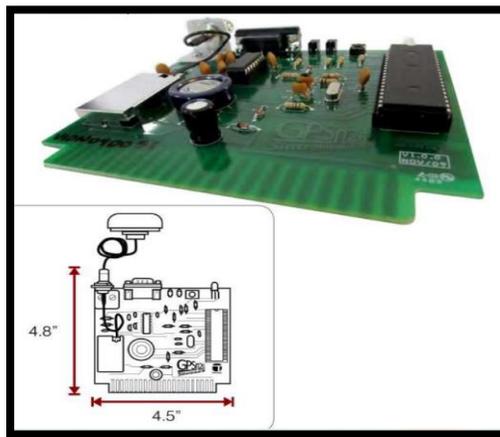
Los usos de este tipo de controlador pueden ser utilizados en diferentes tipos de intersecciones, también tienen la capacidad de conectarse a una red de tipo full dúplex y half dúplex, permitiendo así centralizar el sistema (Tacuar, 2020).

En la Figura 2, se muestra un dispositivo utilizado en el controlador GPS-26, del modelo C26, como puede verse cuenta con una tecnología GPS.

Dicho dispositivo permite generar una señal de pulso de manera síncrona, permitiendo a la antena recibir datos de hora y fecha satelital

Algunas de las características son las siguientes:

- Tarjeta tipo modular de 4.8" x 4.5". Antena GPS.
- Antena GPS tipo anti-robos con cable coaxial.
- Componentes que soportan un alto rango de temperatura.
- Uso de tecnología THRU HOLE.
- Capacidad para aplicar hasta 3 ciclos por día.
- Respaldo de energía en caso de descarga eléctrica.



*Figura 2:* Dispositivo para controlador GPS 26 tarjeta de sincronía GPS para controladores de semáforos.

Fuente: SEMEX(2020).

Una vez que se conocen los componentes físicos de un semáforo, es necesario mencionar qué es lo que los hace funcionar, es por eso se describen los componentes que les permiten estar en funcionamiento:

### **Unidad de Control**

Como se define en el manual de señalización vial y dispositivos de seguridad, esta unidad de control se compone de un conjunto de mecanismos electrónicos, utilizados para adecuar el cambio de luz en los dispositivos de señalización vial, se encuentran en un gabinete, como se muestra en la Figura 3.

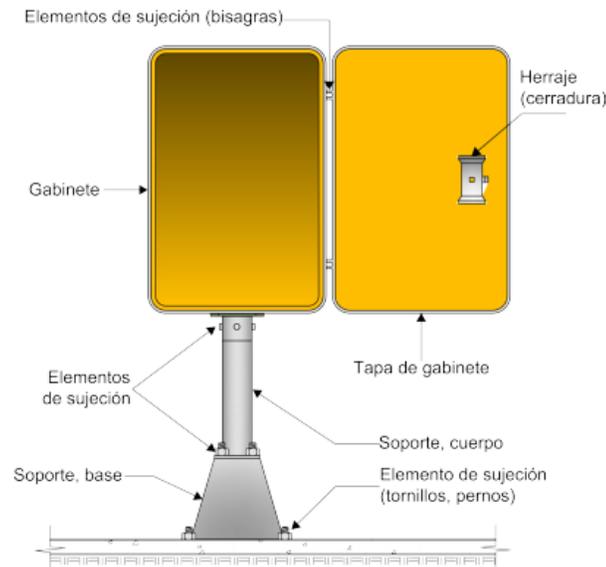


Figura 3: Gabinete de la Unidad de Control.

Fuente: Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad (SCT,2014).

## Microcontrolador

El microcontrolador es un dispositivo electrónico, integrado en un circuito, el cual cuenta con los elementos de un procesador que puede ser programado, cuenta con un sistema que es ajustado a las peticiones solicitadas, son de pequeño tamaño y son configurables, debido a esto su uso ha tenido un gran crecimiento y puede ser utilizado en diferentes ramas (Cando, 2017).

En la Figura 4 se muestra la estructura interna de un microcontrolador:

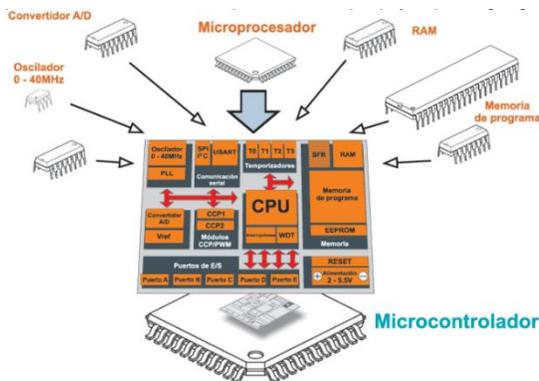


Figura 4: Estructura interna de un microcontrolador en un chip. Fuente: Microcontroladores PIC (Verle M, 2009).

## Componentes de un microcontrolador

Según Valdés y Pallas (2007), el concepto de microcontrolador es una combinación de los subsistemas con los que se cuenta para permitir una interacción entre ellos, permitiendo una sincronización y procesamiento de datos recibidos en los módulos internos, esto se muestra en la Figura 5.

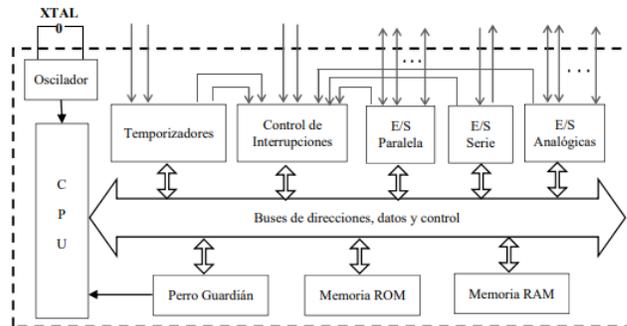


Figura 5: Diagrama de bloques general de un microcontrolador. Fuente: Microcontroladores fundamentos y aplicaciones con PIC.

## Microprocesador

Este dispositivo es un circuito integrado central, tiene un alto nivel de complejidad en un sistema informático, es conocido como el cerebro, constituyendo la unidad central de procesamiento (CPU). Se encarga de ejecutar las instrucciones y programas, como el sistema operativo, aplicaciones, ejecución de tareas y procesos, realiza instrucciones a bajo nivel y operaciones aritméticas simples y lógicas básicas, por mencionar suma, resta, multiplicación, operaciones lógicas y de acceso a memoria (Sánchez, 2013).

## Oscilador

Permite generar pulsos con una frecuencia constante, permitiendo sincronizar operaciones internas, que determinan la velocidad a la que son ejecutadas las instrucciones considerando los circuitos semiconductores (como se indica en la Figura 6).

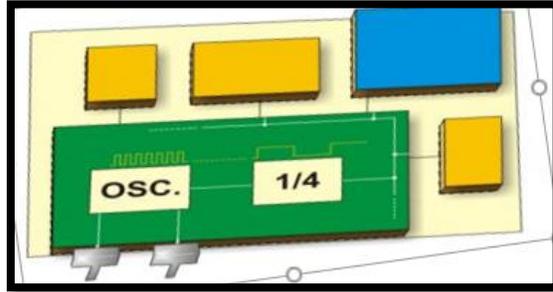


Figura 6: Oscilador generador de pulso. Fuente: Microcontroladores PIC. Verle M (2009).

## 2.8 Redes Neuronales

Una red neuronal artificial (RNA), es inspirada en las redes neuronales biológicas, son consideradas como un conjunto de elementos de procesamiento simples, denominados neuronas y se conectan entre sí. Su fuerza de interconexión es cuantificada mediante pesos. Realizan tareas cerebrales como la de los humanos como el reconocimiento de patrones, reconocimiento del habla; aunque algunos procesos aún no se pueden modelar por a la cantidad de neuronas en a actividad cerebral (Suykens, Vandewalle & De Moor, 2012).

La Figura 7 muestra el diagrama de la neurona genérica que está modelada con base en las neuronas motoras, cuenta con un núcleo y el aparato metabólico celular, se identifica en un extremo de la célula, es el de entrada tiene un número de ramificaciones llamadas dendritas, se le conoce como soma al cuerpo celular, gran cantidad de neuronas tiene una larga y delgada ramificación, el axón, se encuentra lejos del cuerpo celular y se extiende por metros, siendo la línea de transmisión en una neurona.

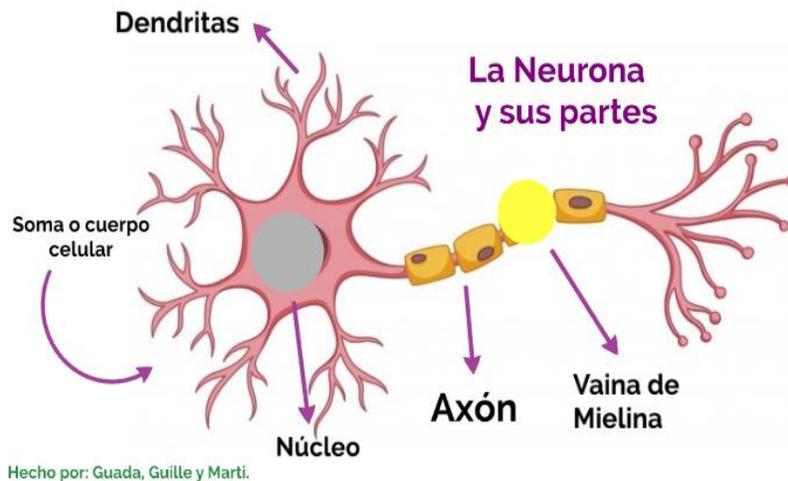


Figura 7: Diagrama de una neurona genérica.  
Fuente: Jaime Torral Barrera (2021).

Para que una neurona funcione de manera correcta el proceso inicia en la recepción de entradas desde otras células, siendo recibidas por las dendritas, posteriormente se procesa mediante las dendritas y el cuerpo e integran esas entradas, para que la información sea transmitida por el axón hacia la sinapsis, dando las salidas correspondientes, mismas que a su vez permiten proporcionar entradas a otras neuronas (Anderson, 2007).

Una gran cantidad de neuronas codifica las salidas en una serie de pulsos periódicos conocidos como potenciales de acción, son originados cerca del soma de la célula, posteriormente propagados al axón, después de este pulso llega a la sinapsis, seguido a las dendritas de la neurona siguiente.

Se deja en claro que la sinapsis es la interconexión entre dos neuronas, tal como se muestra en la Figura 8, en la que el botón sináptico pertenece al término del axón de una neurona pre-sináptica y la dendrita corresponde a una neurona post-sináptica (Saavedra, 2018).

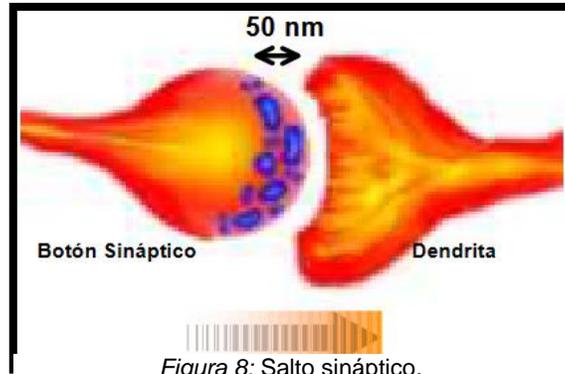


Figura 8: Salto sináptico.  
Fuente: (Saavedra, 2018)

### Modelo de una red neuronal

Las redes neuronales tienen como objetivo construir sistemas capaces de presentar un cierto comportamiento inteligente, esto se genera como en el cerebro humano a través de la experiencia y el comportamiento que generamos ante determinadas situaciones, una red neuronal cuenta con tres partes: entrada, núcleo y salidas (ver Figura 9), se describen a continuación:

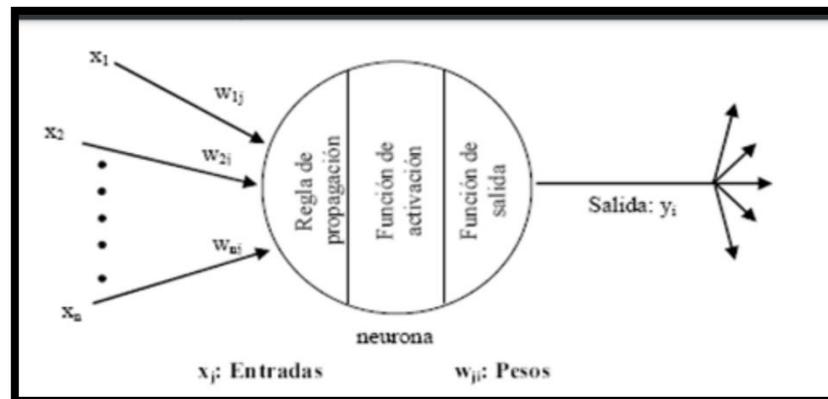


Figura 9: Modelo de una red neuronal artificial.

Fuente: Jaime Torral Barrera (2021).

**Entrada:** Parte de la neurona que permite recibir los datos o parámetros, en la que se decide si es o no activada, es representada con  $x_1, 2, \dots, x_n$ . los pesos ( $w_1,$

$w_2, \dots, w_n$ ), se encuentran entre la entrada y el núcleo, permiten la representación de memoria de la red.

**Núcleo:** Esta parte permite llevar a cabo operaciones indispensables que determinan el resultado final de la neurona; esto dependerá de la red neuronal implementada.

**Salidas:** Son aquellas que comunican la respuesta de la neurona, se representan de manera común como  $y_1, 2, \dots, y_n$ .

En la parte del núcleo de la red neuronal permite llevar a cabo 3 diferentes procesos, mismos que permitirán determinar la salida y son los siguientes:

**Regla de propagación:** Integra la información que viene de diferentes neuronas artificiales, proporcionando el valor del potencial pos sináptico de una neurona  $i$ . (Matich D. J., 2021)

**Función de activación:** Da a conocer el estado actual de una neurona  $i$ .

**Función de salida:** Da a conocer la salida actual de una neurona  $i$ .

Las entradas y salidas se clasifican en dos grupos: binarias y continuas, las primeras sólo admiten dos valores posibles, utilizando dos alfabetos  $\{0,1\}$  o  $\{-1,1\}$ , por otro lado, las permanentes permiten valores dentro de un rango determinado, definido por  $[-1, 1]$ . El tipo de neurona a elegir va a depender del modelo a implementar y del funcionamiento de la misma.

**Pesos ( $w_{ij}$ ):** Es la fuerza del enlace sináptico entre dos neuronas, tomando valores positivos, negativos o cero, cuando la entrada es positiva actúa como excitador, al ser negativo es un inhibidor, para el segundo caso no permite comunicación entre las neuronas.

La regla de propagación da a conocer el potencial resultante de la interacción de la neurona  $i$  con las  $N$  neuronas vecinas, se debe realizar una suma de las entradas ponderadas con sus pesos correspondientes, como se muestra en la ecuación 1.

$$net_i(t) = \sum_{j=1}^N W_{ij} * x_j(t) \quad (1)$$

Se conocen dos tipos de reglas de aprendizaje que son:

Cuando hablamos de aprendizaje supervisado y no supervisado, encontramos como diferencia la existencia o no de un agente externo, conocido como supervisor que controla el aprendizaje de la red (Flores Lopez, 2008).

**Aprendizaje supervisado:** Cuenta con un agente externo (supervisor o maestro) que controla el proceso de entrenamiento mismo que establece una respuesta que se generará en la red (output del sistema) a través de una entrada, el supervisor verifica el resultado o salida, comparándola con la salida deseada, si hay desigualdad nivela los pesos hasta lograr una salida deseada. (Flores Lopez, 2008).

Según Flores López (2008), el tipo de algoritmo de aproximación identifica tres tipos de aprendizaje supervisado mencionados a continuación: por corrección de error, por refuerzo o de tipo estocástico.

**Aprendizaje por corrección de error:** Su funcionamiento es basado en el acomodamiento de los pesos de las conexiones de la red a partir de la diferencia entre los valores deseados y obtenidos por el sistema, esto es, en función del error cometido en la salida.

**Aprendizaje por refuerzo:** El supervisor es limitado a dar a conocer, a través de una señal de refuerzo, que es definida como éxito=+1 o fracaso=-1.

En caso de que la salida dada por la red se ajusta o no a la deseada y en función de ello, se realiza un ajuste de los pesos, utilizando un mecanismo basado en cálculos probabilísticos, este tipo de aprendizaje es denominado de "premio-castigo", es un poco más lento que el mencionado previamente.

**Aprendizaje estocástico:** Es basado en los cambios random en los valores de los pesos de la red, evalúa su efecto a partir de la salida deseada y de una distribución de probabilidad, su aprendizaje consiste en minimizar la energía del sistema a través del ajuste de los pesos, si la energía es menor después del cambio, se acepta la modificación; si la energía no es menor, la aceptación del cambio depende de una distribución de probabilidad determinada. La *Tabla 1* resume los modelos más destacados de redes con aprendizaje supervisado.

Tabla 1 Principales modelos RNAs con aprendizaje supervisado

Tipos de aprendizaje supervisado		Modelo de red
Aprendizaje por corrección de error	Off-line	Perceptrón
		Adaline/Madaline
		Backpropagation
		Brain- State- in-a-Box
Aprendizaje por refuerzo	On-line	Linear Reward Penalty
		Adaptative Reward Penalty
		Adaptative Heuristic Critic
Aprendizaje estocástico	Off-line	Boltzmann Machine
		Cauchy Machine

Fuente: Adaptado de Hilera y Martínez (2019).

## Aprendizaje no supervisado

Una red con este tipo de aprendizaje no requiere información de fuera que permita nivelar los pesos de las conexiones de las neuronas, este tipo genera una red con un conjunto de patrones sin llevar una respuesta ideal por lo que la red, por medio del algoritmo de aprendizaje, estima la función de densidad probabilística  $p(x)$  que describe la distribución de patrones  $x$ ,  $x \in R^P$  (Flores Lopez, 2008).

Existen dos tipos de aprendizajes no supervisado:

**Aprendizaje hebbiano:** Permite extraer características de los datos de entrada, su fundamento es si dos neuronas  $N_i$  y  $N_j$  toman el mismo estado de manera simultánea (ambas activas o inactivas), el peso de la conexión entre ambas se incrementa, se tiene que las entradas y salidas permitidas a la neurona son:  $\{-1,1\}$  o  $\{0,1\}$ , estamos hablando de neuronas binarias, es decir tiene 2 estados activa o inactiva.

## Entrenamiento de una red neuronal

Cuando el ser humano nace, no tiene idea de dónde se encuentra, sin embargo, meses atrás se alojó en el vientre materno, derivado de que el cerebro ya está formado, se empiezan a adquirir conocimientos como escuchar la voz de la madre. Conforme se crece, el hombre desarrolla habilidades y aprendizajes, Jean Peaget desarrollo la teoría del desarrollo cognitivo (1896-1980), quien formuló un modelo explicativo sobre el aprendizaje basado en el concepto de la acción de la experiencia, un ejemplo es cuando se toca algo caliente, duele, posteriormente, al ver una olla caliente, o algo que genere demasiado calor puede ocasionar esa molestia. Un caso similar ocurre para generar un entrenamiento en las redes neuronales artificiales, ya que se debe ajustar el peso, para que al aplicar a la entrada un patrón se active la neurona de la capa de Reconocimiento asociada a un patrón almacenado similar, evita la destrucción parcial o total de los patrones previamente almacenados (Olabe, 2019).

La Figura 10 muestra una sesión de entrenamiento de una red ART, dicha red cuenta con letras mostradas, representadas por pequeños cuadrados de una rejilla de 8x8. En la parte izquierda se representa el conjunto de vectores de entrada y en la parte derecha se representan los patrones almacenados (Olabe, 2019).

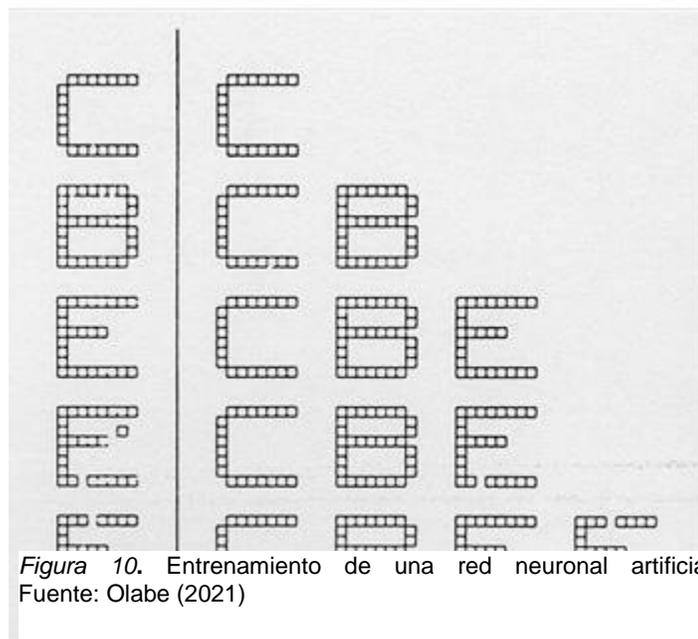


Figura 10. Entrenamiento de una red neuronal artificial.  
Fuente: Olabe (2021)

## CAPÍTULO III MARCO CONTEXTUAL

---

### 3.1 Tiempos de semáforo

En este apartado se presenta el contexto que permitirá conocer la operación de una intersección con semáforo, para lo cual se presentan las siguientes definiciones (Cal y Mayor Reyes, 1994).

**Indicaciones de señal:** Se conoce así al destello luz del semáforo, puede ser de color amarillo, rojo o verde, también a la combinación de luces encendidas al mismo tiempo.

**Ciclo o longitud de ciclo:** Es el tiempo establecido que tarda el semáforo para completar la secuencia de las 3 luces de manera íntegra, también llamado como el tiempo total de un ciclo.

**Intervalo:** Espacio de tiempo dentro de un ciclo donde no cambia las indicaciones de señal.”

**Fase:** Según Cay Mayor (1994), define la fase como la parte del ciclo en donde se presentan uno o más movimientos simultáneos.” Dichas fases permiten ordenar movimientos en diferentes intervalos de tiempo, es decir que cuando una fase inicia cuando los vehículos que se encuentran con derecho de paso empiezan a perderlo, esto es cuando da inicio al cambio de luz de color amarillo en el semáforo y termina cuando el otro flujo pierde su derecho de paso, esto significa que se ha terminado la luz de color verde, dicho en otras palabras la fase se determina con un intervalo de luz amarilla, uno de todo rojo y uno de color verde.

**Movimiento:** Es la manipulación o las maniobras tienen derecho de paso simultáneamente. En la Figura 11 se muestra el comportamiento de este concepto.

**Secuencia de fases:** El orden en que se presentan cada una de las fases. En la Figura 12 se muestra el comportamiento de este concepto.

**Reparto:** Pedazo de tiempo total de ciclo que es asignado a cada una de las fases.

**Intervalo de despeje:** Es el tiempo total destinado a que la luz se encuentra en color amarillo, esto da a conocer que la luz amarilla se encuentra por concluir.

**Intervalo todo rojo:** Es el tiempo de indicación de la luz roja destinado a permitir el despeje de la intersección para el movimiento que tiene el derecho de paso después de la luz amarilla.

**Intervalo de cambio de fase:** Es un periodo de tiempo dentro del ciclo que incluye la indicación de amarillo de advertencia de cambio de fase y que puede incluir un intervalo de todo rojo.

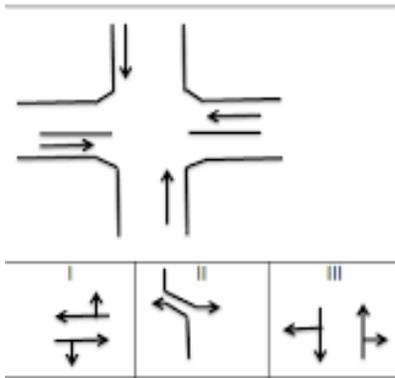


Figura 11: Fase de semáforos

Fuente: Cal y Mayor (1994).

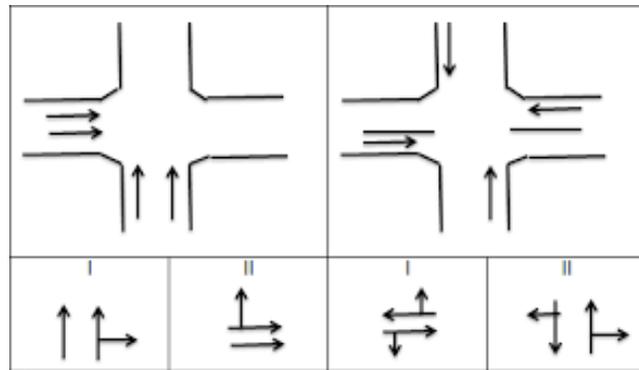


Figura 12: Secuencia de fases.  
Fuente: Cal y Mayor (1994)

Los tiempos de semáforo son establecidos con el objetivo de que el tiempo de demora sea el menor en las intersecciones, puede ser llevado a cabo al permitir un gran número de movimientos en cada una de las fases, permitiendo el paso de gran cantidad de automóviles posible, se debe reducir el número de fases, garantizando seguridad, permitiendo un máximo flujo vehicular.

### 3.2 Cálculo de los tiempos del semáforo

Para realizar un análisis de control en las intersecciones con semáforo y la obtención de manera manual o por la modelación por computadora, es necesario conocer los conceptos descritos anteriormente, a continuación, se describen los elementos a considerar en el cálculo de los tiempos del semáforo y su reparto en las diferentes fases.

### **Intervalo de cambio de fase**

Tiene como función notificar a los usuarios de un cambio en la asignación del derecho de uso de la intersección, para calcularlo se considera el tiempo de reacción del conductor, tiempo y espacio de deceleración y el tiempo para despejar la intersección, utilizando la ecuación 2.

Intervalo de cambio = Ámbar + Todo Rojo

$$Y = \left[ t + \frac{v}{2a} \right] + \left[ \frac{W + L}{v} \right] \quad (2)$$

Donde:

y = intervalo de cambio de fase, ámbar más todo rojo (s)

t = tiempo de percepción- reacción del conductor (usualmente 1.00 s)

v = velocidad de aproximación de los vehículos (m/s)

a = tasa de deceleración (valor usual 3.05 m/s<sup>2</sup>)

W = ancho de la intersección (m)

L = longitud del vehículo (valor sugerido 6.10 m)

### **Longitud del ciclo**

La demora mínima de todos los vehículos en una intersección con semáforo se puede obtener para una longitud de ciclo óptimo de la ecuación 3.

$$C_0 = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^{\Phi} Y_i} \quad (3)$$

Donde:

$C_0$  = tiempo óptimo de ciclo (s)

$L$  = tiempo total perdido por ciclo (s)

$Y_i$  = máximo valor de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación para el acceso o movimiento o carril crítico de la fase  $i$

$\Phi$  = número de fases

### ***Vehículos equivalentes:***

Este factor debe ser considerado, derivado de que existen vehículos pesados, entonces se hace un factor de ajuste para buscar una equivalencia, esto se calcula con la ecuación 4:

$$f_{VP} = \frac{100}{100 + P_C (E_C - 1) + P_B (E_B - 1) + P_R (E_R - 1)} \quad (4)$$

Donde:

$f_{VP}$  = factor de ajuste por efecto de vehículos pesados

$P_C$  = porcentaje de camiones

$P_B$  = Porcentaje de autobuses

$P_R$  = Porcentaje de vehículos recreativos

$E_C$  = automóviles equivalentes a un camión

$E_B$  = automóviles equivalentes a un autobús

$E_R$  = automóviles equivalentes a un vehículo recreativo

### **Flujo de saturación y tiempo perdido.**

Hablar del flujo de saturación hace referencia al volumen máximo de vehículos que pueden pasar por una intersección posteriormente del cambio de semáforo rojo a verde, alertando un estado de verde saturado.

Durante el periodo de cambio de color rojo a color verde, se determina la existencia de demora o tiempo perdido, esto es debido a que los vehículos que cruzan la línea al arrancar llevan una velocidad menor durante los primeros segundos hasta alcanzar una velocidad de marcha normal.

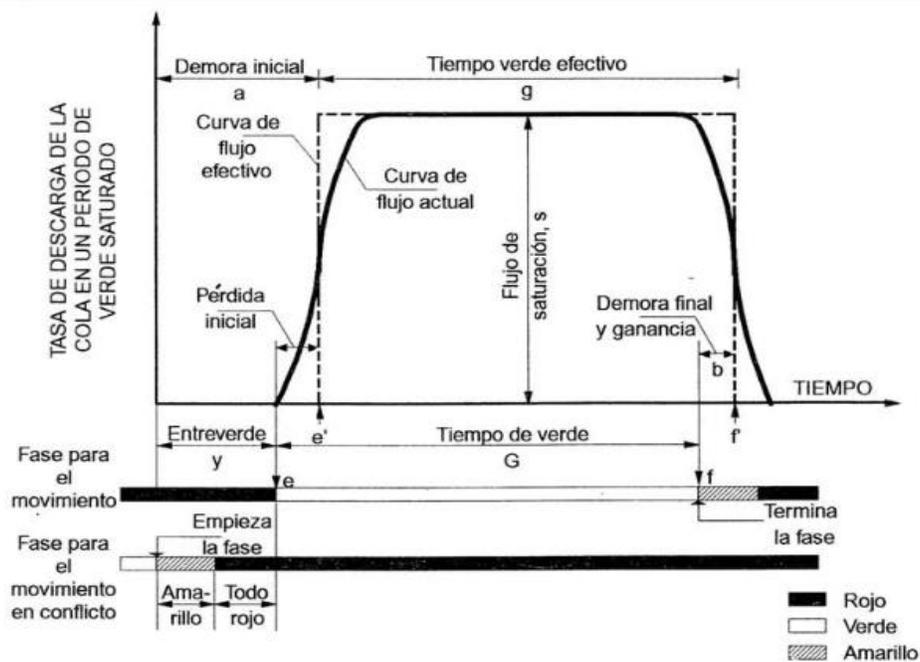


Figura 13: Modelo básico del flujo de saturación.

Fuente: Akcelik Rahmi (1989).

En la Figura 13 se muestra el modelo descrito anteriormente, el tiempo total perdido es obtenido mediante la ecuación 5:

$$L = \left( \sum_{i=1}^{\Phi} l_i \right) + TR \quad (5)$$

El tiempo verde efectivo se obtiene de la *expresión matemática 6*:

$$g_i = \frac{Y_l}{\sum_{i=1}^{\phi} Y_i} (g_r) \quad (6)$$

### 3.3 Intersecciones en los semáforos

Las intersecciones son definidas como el cruce de dos o más vialidades, el concepto de ramal son los tramos de vías que convergen en la intersección, dichos puntos son esenciales en el sistema vial, porque son zonas donde los usuarios cambian de trayectoria y así llegar a su destino, razón por la cual es necesario operarlas de manera adecuada, así se evitarán conflictos de los diferentes tipos de movimiento. (Jiménez, 2013).

Estos puntos son críticos, pueden disminuir el nivel de servicio de la vialidad al reducir la velocidad del tránsito, y debido a que son puntos que se congestionan primero, los conductores deben esperar cierto tiempo para atravesar la intersección, un adecuado manejo de estos permite tener una reducción de accidentes.

De acuerdo con el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico (DG-2013), las intersecciones se clasifican de acuerdo al número de ramales y de acuerdo a su forma geométrica:

**Intersección Tipo T:** Son intersecciones conformadas por tres ramales, como se muestra en la Figura 14, en donde uno de los ramales es principal y uno de los otros sirve para desahogar o desviar la vialidad (Patiño, 2016).

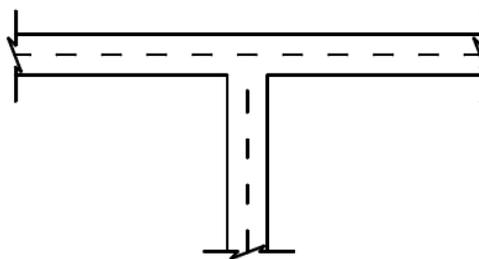


Figura 14: Intersección Tipo T.

Fuente: Patiño (2016)

**Intersección Tipo Y:** También se compone por tres ramas, pueden existir dos configuraciones: el primero en donde dos ramales se unen y forman uno principal o viceversa, en donde un ramal se divide en dos direcciones diferentes, se muestra en la Figura 15.

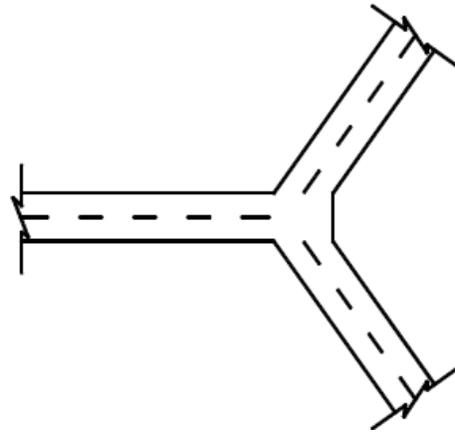


Figura 15: Intersección Tipo Y.

Fuente: Patiño (2016).

**Intersección Tipo Cruz:** Se componen por cuatro ramas que forman una cruz, se muestra en la Figura 16.

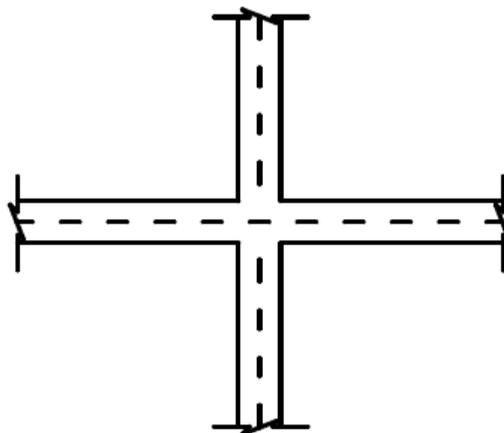


Figura 16: Intersección Tipo cruz.

Fuente: Patiño (2016)

**Intersección Tipo X:** Al igual que en la intersección tipo cruz, se forman con cuatro ramas que se cruzan entre sí en ángulos distintos a  $90^\circ$ , se muestra en la Figura 17.

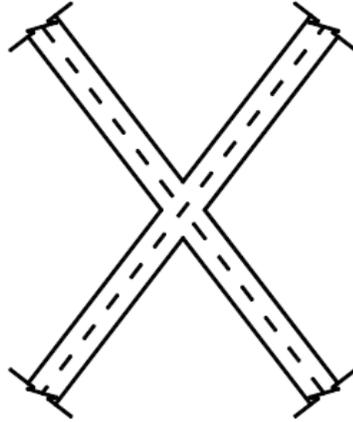


Figura 17: Intersección Tipo X

Fuente: Patiño, 2016.

**Intersecciones múltiples:** Se compone por más de cuatro ramas y se consideran de las intersecciones más complicadas de operar, se muestra en la Figura 18.

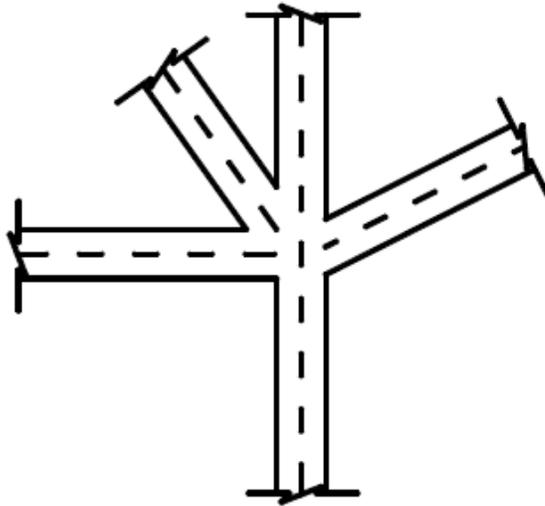


Figura 18: Intersecciones múltiples Tipo X

Fuente: Patiño (2016).

**Intersección Desfasada:** Puede referirse a una intersección tipo cruz, con la diferencia que un par de sus ramas no se encuentran alineadas, se muestra en la Figura 19.

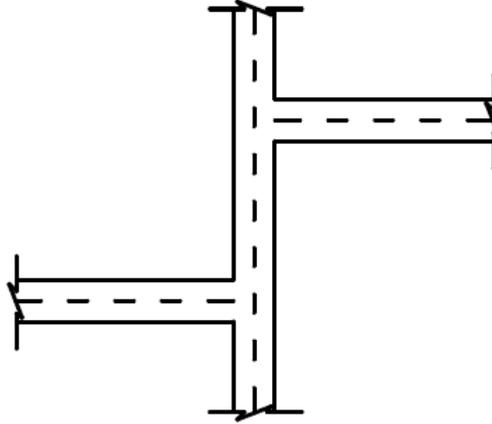


Figura 19: Intersección Desfasada

Fuente: Patiño (2016).

**Intersección giratoria:** Se les conoce también como rotondas o glorietas. Este tipo de intersecciones une los tramos de vías sobre un aro circular donde los vehículos tienen que girar hasta encontrar la vía hacia donde se dirigen, ver en Figura 20.

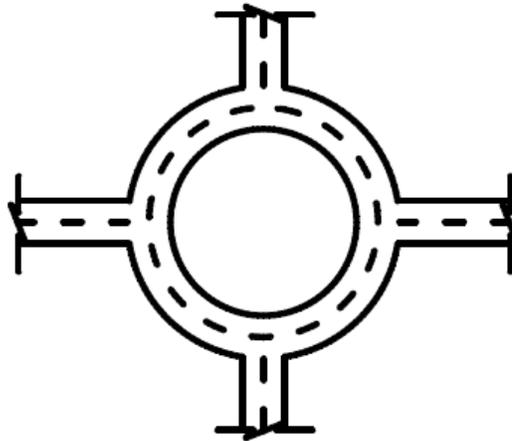


Figura 20: Intersección giratoria

Fuente: Patiño (2016).

### 3.4 Sistema de semáforos en una ciudad

En Toyota (2020), se hace el análisis del tráfico en diferentes puntos y determinando los patrones de flujo programando semáforos y que al ser instalados tengan un comportamiento de una o de otra forma, dependiendo la variación de los tiempos de cada fase, accediendo un paso de vehículos según la demanda (Toyota, 2020).

Los cambios de las fases de color verde a color rojo son coordinados a través de un Centro de Gestión de Tráfico (CGT), regulando el funcionamiento de los semáforos existentes de una zona, ya que son controlados en una red, unidos mediante cable subterráneo, permitiendo la comunicación entre ellos. Se cuenta también con sensores de presión bajo el asfalto en algunas intersecciones primarias, si el sensor detecta el auto se activa el semáforo en color verde, permitiendo regular el tráfico.

### 3.5 Sistema de semáforos utilizado en la ciudad de Toluca

Como lo comenta Martínez Muñoz (2020), Toluca de Lerdo, es la Capital del Estado de México, se encuentra a gran altura del centro del país, se convirtió en Ciudad el 12 de septiembre de 1799, es la quinta ciudad más grande del país con una gran concentración urbana del Estado de México.

Forma parte de la Megalópolis del Centro de México<sup>1</sup> y mantiene una intensa dinámica económica y laboral con la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM); tan solo el corredor Toluca-Ciudad de México presenta un flujo promedio de viajes diarios de 500 000 automóviles y 20 000 autobuses, como se muestra en la Figura 21 (SCT, 2012).



*Figura 21: Flujo promedio de viajes diarios.*

Fuente: Centro Mario Molina (2012)

Con estos datos, se puede concluir que se tiene una gran afluencia vehicular, es por ello que se requiere optimizar el sistema de semáforos para permitir hacer de la movilidad un buen funcionamiento por esto la Dirección General de Seguridad Pública, cuenta con una red de semáforos de jurisdicción municipal, misma que cuenta con 269 intersecciones y opera 162 intersecciones de manera centralizada y 107 intersecciones en tiempos fijos. A continuación, se describen los sistemas de semáforos existentes en la ciudad de Toluca.

#### *Sistema de semáforos centralizado.*

Son aquellos que se encuentran centralizados, en la ciudad de Toluca en una visita a la Dirección General de Seguridad Pública, en entrevista con la jefa de Planeación y Proyectos de la dirección de Sustentabilidad Vial en Toluca, en el 2019, da a conocer que la red vial de la zona centro de Toluca pertenece a una central que opera en atención a la demanda vehicular, mediante el uso de un software que agiliza el volumen vehicular en los diferentes puntos, optimizando de acuerdo a las preferencias de las calles y avenidas, dando los mejores tiempos a los semáforos en toda la red vial, considerando la coordinación que deben tener avenidas importantes, tales como son Lerdo, Morelos, Gómez Farías e Hidalgo, entre otras.

El software es controlado por personal altamente capacitado, ya que debe manejar diferentes planes de asignación de tiempos de semáforo, según la demanda, esto se encuentra en un site de datos con acceso a personal autorizado.

También hay un sitio especial para monitoristas de la red vial, quienes cuentan con equipo de cómputo y pantallas, son encargados para revisar el comportamiento vial, en caso de existir un problema se alerta al responsable del mantenimiento técnico para que se atienda de manera inmediata.

Dicha información es generada para ser útil en la gestión del tráfico, ya que es capturada en tiempo real, lo que permite recolección de datos, gestión de emergencias y control de la administración de semáforos.

### *Semáforos de tiempos fijos*

Los semáforos en tiempos fijos están conectados a una central, estos deben ser programados mediante el uso de un software y por el personal capacitado. Se requiere conocer la información, mediante un estudio de tránsito previo para saber los tiempos en verde, amarillo y rojo, así como las fases o movimientos permitidos dentro del ciclo total de operación.

La red vial de la Zona Centro de Toluca Centralizada, opera en atención a la demanda vehicular, sin embargo, no se le había dado el mantenimiento adecuado a la parte de la comunicación, por lo que algunas intersecciones no estaban comunicadas desde la calle hasta el centro de control. Es decir, funciona mediante unos sensores llamados espigas electromagnéticas, ubicados en la carpeta asfáltica, mismos que van conectados al control, que es enviado a la central mediante el uso de un software llamado SCATS, se determina, según el aforo vehicular el ciclo de 120 o 60 en color verde.

Por medio del uso del software se puede ver si existe congestión vial, si el foco de alguno de los semáforos se funde y por lo tanto permite que el personal correspondiente haga los cambios necesarios. Gracias a este tipo de sistema centralizado se puede llevar a cabo la ola verde, misma que se implementa para evitar tránsito y en vialidades como José María Morelos, va pasando el pelotón en cada una de las intersecciones.

Para las 107 intersecciones en tiempos fijos, se utiliza un controlador de semáforos C-26, mismos que son programados uno por uno, en caso de que exista algún fallo, se tiene que ir a hacer el cambio, para ello existe personal que hace rondines para ver el funcionamiento de esas intersecciones y llevar a cabo el mantenimiento correspondiente, desafortunadamente en este tipo de semáforos no se puede hacer una sincronización general, o poder trabajar con ellos en tiempo real, todo es de manera manual.

Es importante conocer la ubicación de los semáforos de tiempo fijo de la Ciudad de Toluca, para ello se logró obtener un mapa con las intersecciones que tienen el problema, en caso de entrar en detalle en el tema será necesario ir nuevamente a

la Dirección General de Seguridad Pública para poder solicitar esta información mediante una solicitud previa correspondiente y así obtener con claridad y precisión los sitios dónde se encuentran los semáforos de tiempo fijo, que es de gran utilidad para resolver la problemática mencionada anteriormente, para fines de este trabajo, se logró obtener la información mostrada en la Figura 22 se muestra el mapa de la ciudad de Toluca, que muestra la ubicación de las intersecciones (puntos de color azul) que cuentan con semáforos de tiempo fijo según la Dirección General de Seguridad Pública.

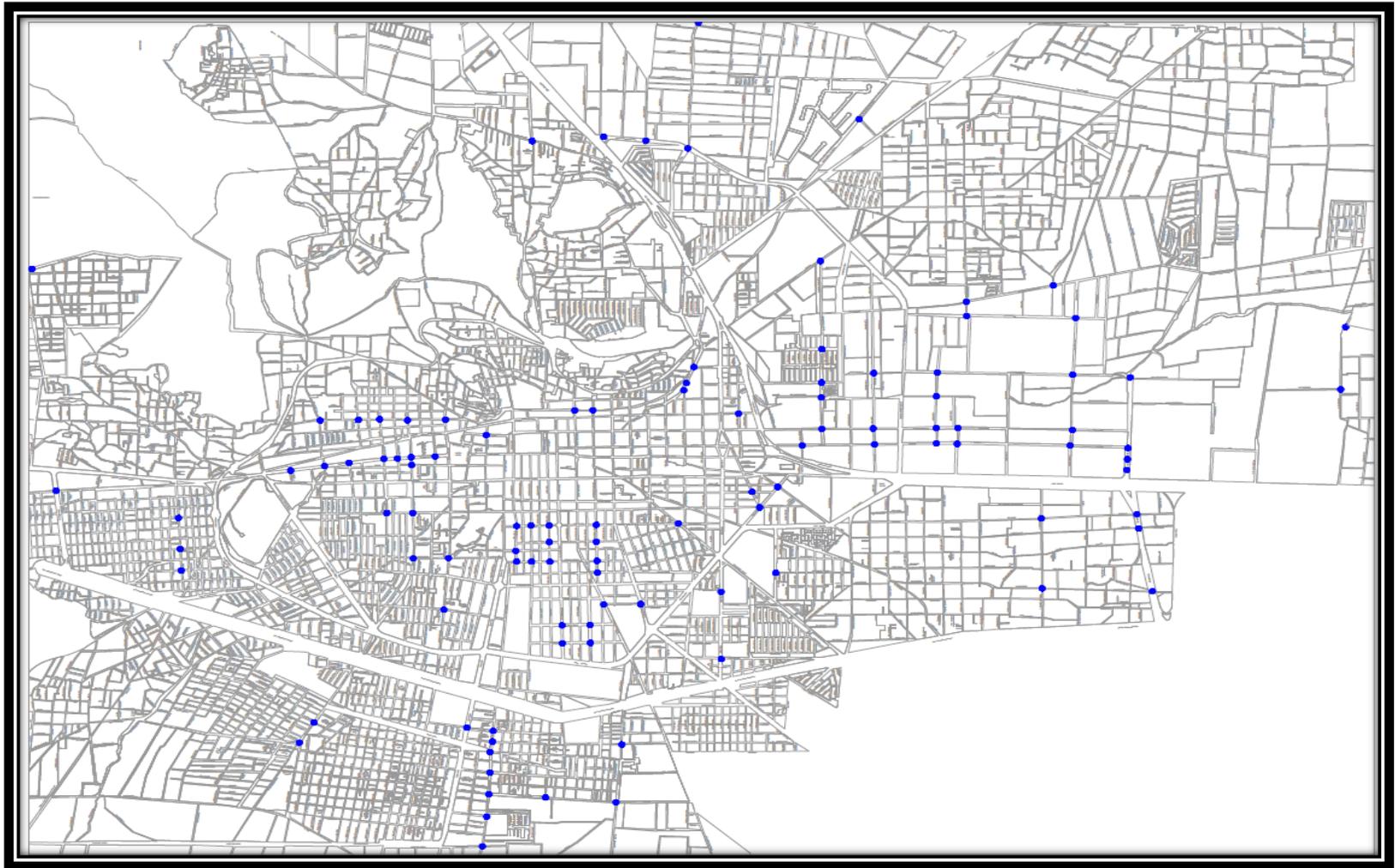


Figura 22: Intersecciones con semáforos de tiempo fijo en Toluca.

Fuente: Dirección General de Seguridad Pública, (2021).

## CAPÍTULO IV DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

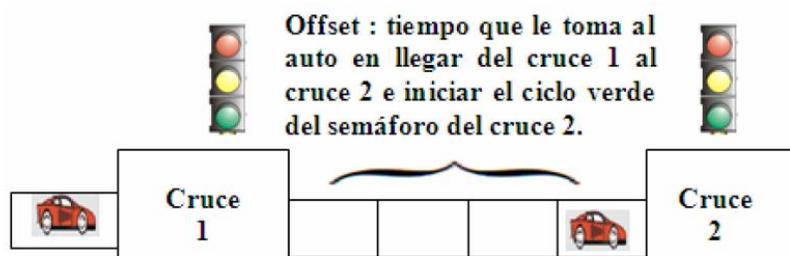
---

Como ya se mencionó en capítulos anteriores algunos conceptos básicos que permitirán entender este capítulo, de igual manera se mencionó el estado del arte, dónde se detallan algunos avances de la inteligencia artificial aplicada a la sincronización de los semáforos. Este capítulo es desarrollado para abordar el diseño del prototipo de sincronización de semáforos de tiempo fijo en la ciudad de Toluca mediante el uso de inteligencia artificial.

### 4.1 Propuesta del cálculo de sincronización de semáforos en la Ciudad de Toluca

Este trabajo, como ya se mencionó, trabajará con las 107 intersecciones de tiempo fijo existentes en la Ciudad de Toluca, es importante dar a conocer cómo se sugiere llevar a cabo la sincronización de los semáforos de dichas intersecciones, según Gómez Hernández se referencia los pasos a seguir (Gómez Hernández, 2009).

- 1.- Establecer el cruce que tiene una mayor demanda vehicular dentro de la red de intersecciones específicas, la finalidad de este paso es mejorar el flujo de este cruce para que repercuta en todo el circuito.
- 2.- Calcular el tiempo de duración de los ciclos del semáforo, calculando los tiempos del ciclo rojo y verde en el cruce de mayor demanda, el cálculo se realiza con las expresiones matemáticas mencionadas en el capítulo anterior, cabe mencionar que dicha información la tiene el personal del municipio de Toluca.
- 3.- Según Gómez Hernández (2009) utilizando el concepto para realizar el cálculo del offset de cada cruce, permite conocer el tiempo que le toma a los vehículos



iniciar su movimiento y así llegar al siguiente estado (semáforo), como se muestra en la Figura 23 (Gómez Hernández, 2009).

*Figura 23: Offset*

Fuente: Gómez Hernández, (2009).

## **4.2 Utilizando Matlab en la sincronización de semáforos**

Después de obtener el cálculo de los tiempos de semáforo para las intersecciones con semáforos fijos en la Ciudad de Toluca, se hace el uso del software de Matlab, dicho software viene de la abreviatura de MATrix LABoratory (Laboratorio de matrices); siendo un sistema numérico que permite ofrecer un entorno de desarrollo integrado, permite llevar a cabo el análisis y el diseño de sistemas, permitiendo un aprendizaje autónomo, procesa señales, imágenes, visión artificial, entre otros. Cuenta con una herramienta o toolbox conocida como SIMULINK, que permite simular el comportamiento de los sistemas dinámicos.

Cabe mencionar que para poder implementar esta propuesta es necesaria la utilización de este software, con su toolbox mencionada, dentro de la misma permite crear máquinas de estado (stateflow), esto permite combinar la electrónica y la computación en sus diferentes ramas, permitiendo así a las máquinas de estado realizar de manera metódica el análisis y síntesis de los circuitos, las cuales son de gran importancia para el desarrollo del presente trabajo.

Una máquina de estado es un modelo computacional que realiza operaciones para los procesos relacionados con el cambio de estados en lugar de un flujo de control. Un estado define lo que un dispositivo puede hacer en un tiempo determinado. Las máquinas de estado son un modo habitual de mostrar un conjunto de estados interrelacionados de un proceso. Una máquina de estado popular es un dispensador de bebidas. Se insertan algunas monedas en la máquina y junto con la bebida se proporciona el cambio exacto. La máquina de estado calcula mecánicamente el valor de las monedas que se insertan y las monedas que debe devolver al cliente (IBM, 2021).

Después de conocer los tiempos de semáforo, se hace uso de las máquinas de estado para los cambios de color o ciclo de un semáforo, la Figura 24, muestra el comportamiento de un semáforo cuando se encuentra en el color amarillo, al momento de parpadear, se sabe que posterior a este comportamiento, el cambio de color será a rojo.

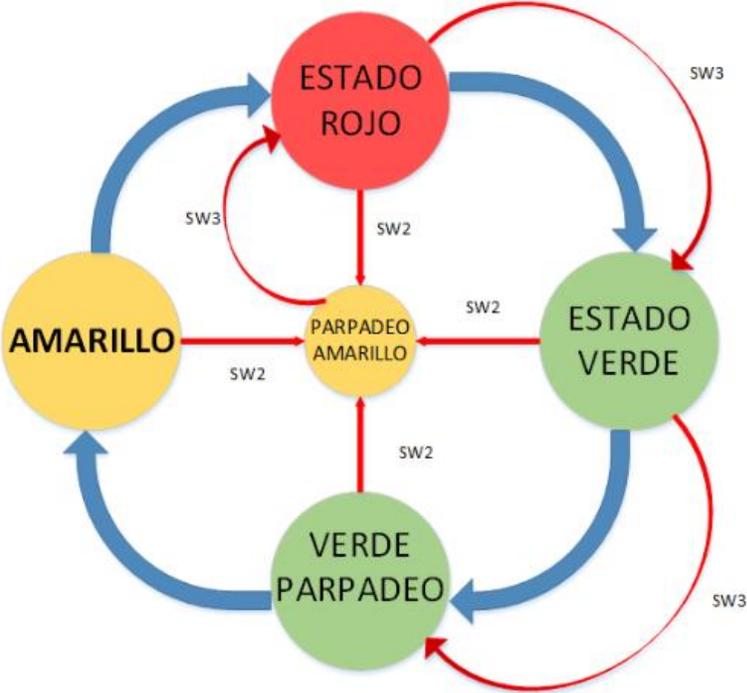


Figura 24: Máquina de estados de un semáforo.

Fuente: SEPI-ESIME-ZAC, microcontroladores, (2015).

Los estados principales son los cuatro círculos grandes: estado rojo, estado verde, verde parpadeo y amarillo. Estas son los estados normales de un semáforo. Cada uno tiene un tiempo asignado, tiempo que da la duración activa de cada estado. Así mismo las flechas gruesas de color azul son las que indican el funcionamiento en operación normal. En la Figura 25 se muestra la implementación de un stateflow aplicado a los colores de un semáforo, utilizando SIMULINK.

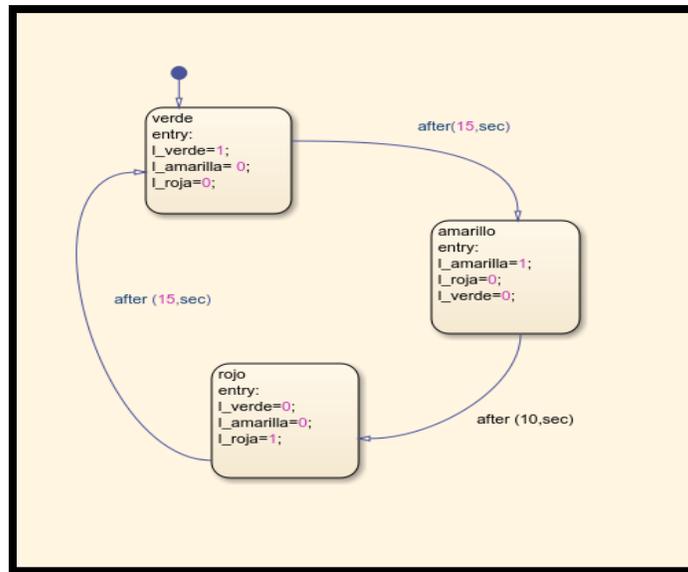


Figura 25: Máquina de estados de un semáforo en Simulink.

Fuente: Elaboración propia, utilizando Matlab Simulink(2021)

En la Figura 26 se muestra la simulación de la máquina de estados definida en la figura anterior.

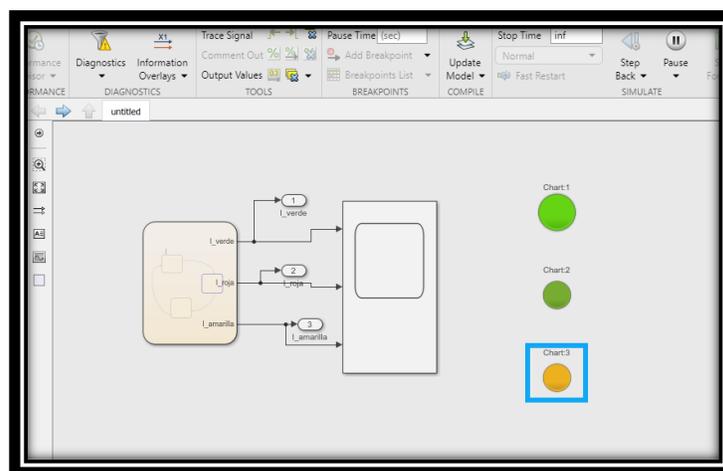


Figura 26:

Cambio de luces utilizando Simulink. Fuente: Elaboración propia, utilizando Matlab Simulink(2021)

Cambio de luces

### 4.3 Utilizando Arduino en la sincronización de semáforos

Ahora se tienen que llevar a una tarjeta Arduino, que permitirán simular una intersección, esto se implementa a través de un código fuente y se utiliza el software de IDE Arduino, la cual es una plataforma de creación electrónica de código abierto, basada en hardware y software libre, permitiendo la creación de distintos tipos de microordenadores de una sola placa a los que la comunidad de creadores puede darles diferentes tipos de uso, en la Figura 27 se puede ver una placa Arduino.

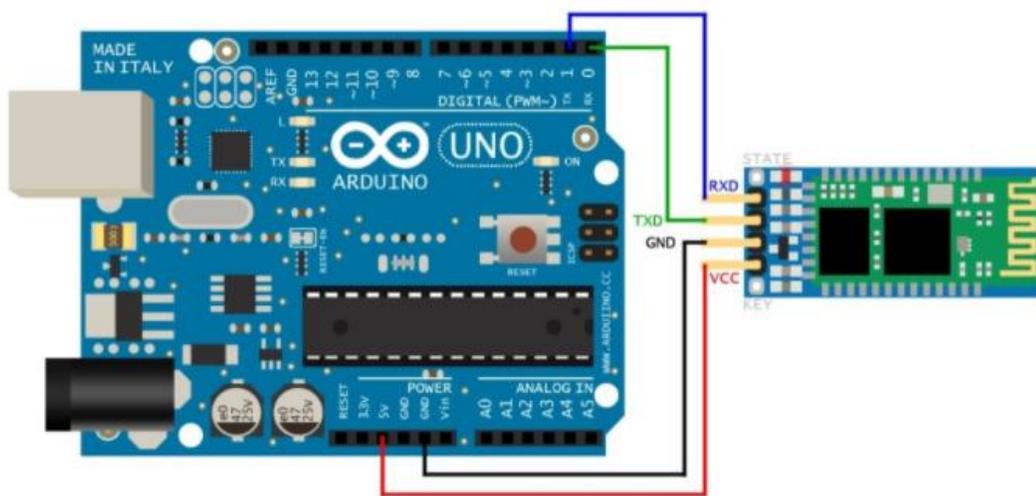


Figura 27: Placa Arduino. Fuente: Fernández Yúbal, (2020)

El funcionamiento en una tarjeta arduino se realiza mediante microcontroladores, que son circuitos integrados; mismos que realizan la grabación de instrucciones, utilizando un lenguaje de programación, puede ser utilizado el entorno Arduino IDE, gracias a esto se puede crear programas que interactúan con los circuitos de la placa. Posee lo que se llama una interfaz de entrada, que es una conexión en la que podemos conectar en la placa diferentes tipos de periféricos. La información de estos periféricos que conectes se trasladará al microcontrolador, el cual se encargará de procesar los datos que le lleguen a través de ellos, este tipo de periféricos pueden ser cámaras, teclados que permiten introducir datos o sensores, entre otros (Fernández, 2020). A continuación, se ejemplifica en la Figura 28 un código extraído de Martínez Mendoza (2015), donde se muestra cómo se programa un ciclo de semáforo (Mendoza, 2015).

```

/** Definiciones */
int rojo=2;      //definimos el valor del pin para el led rojo
int amarillo=4; //definimos el valor del pin para el led amarillo
int verde=7;    //definimos el valor del pin para el led verde

/** Programa */

void setup() {
  pinMode(verde,OUTPUT); //declaramos el pin verde como salida
  pinMode(amarillo,OUTPUT); //declaramos el pin amarillo como salida
  pinMode(rojo,OUTPUT); //declaramos el pin rojo como salida
}

void loop() {
  digitalWrite(verde,HIGH); //encendemos el led rojo
  delay(2000); //esperamos 2 segundos
  digitalWrite(verde,LOW); //apagamos el led rojo
  delay(500); //esperamos medio segundo

  digitalWrite(amarillo,HIGH); //encendemos el led amarillo
  delay(2000); //esperamos 2 segundos
  digitalWrite(amarillo,LOW); //apagamos el led amarillo
  delay(500); //esperamos medio segundo

  digitalWrite(rojo,HIGH); //encendemos el led verde
  delay(2000); //esperamos 2 segundos
  digitalWrite(rojo,LOW); //apagamos el led verde
  delay(500); //esperamos medio segundo
}

```

Figura 28: Código de simulación de un semáforo. Fuente: Martínez Mendoza, (2015)

## TTGO LORA 32 Y EL IDE ARDUINO

LORA es una tecnología inalámbrica (al igual que WiFi, Bluetooth, LTE, SigFox o Zigbee) que emplea un tipo de modulación en radiofrecuencia patentado por Semtech, una importante empresa fabricante de chips de radio.

Algunas de sus ventajas son:

- Alta tolerancia a las interferencias
- Alta sensibilidad para recibir datos (-168dB)
- Basado en modulación “chirp“
- Bajo Consumo (hasta 10 años con una batería)
- Largo alcance 10 a 20 km

- Baja transferencia de datos (hasta 255 bytes)
- Conexión punto a punto

El TTGo Lora 32 es una placa de desarrollo ESP32 con un chip LORA incorporado y un display OLED de 0.96 pulgadas, que como se mencionó anteriormente permite enviar y recibir paquetes y en conjunto con el IDE de Arduino se logra el objetivo de este trabajo.

En la Figura 29, se muestra dicha placa, cabe mencionar que para lograr el objetivo de este trabajo se han conseguido dos placas con las características mencionadas anteriormente, esto es para trabajar punto a punto en el envío y recepción de información.

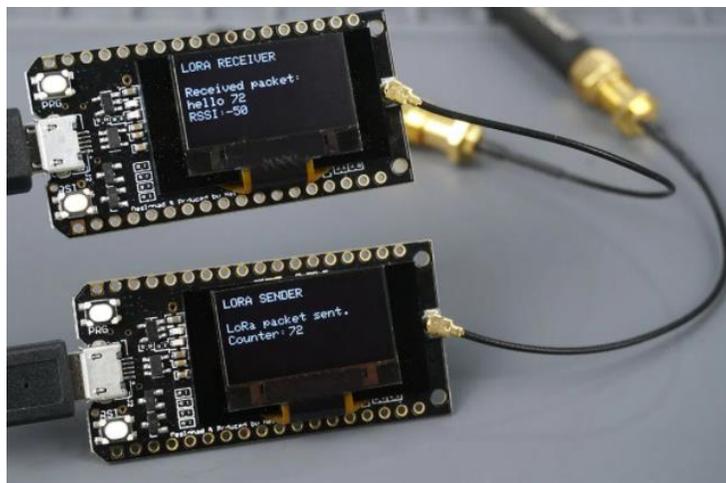


Figura 29: TTGO Lora

Fuente: Elaboración propia, (2021).

La Figura 30 muestra la placa ya con la antena, ésta debe ser colocada antes de conectarla, para evitar daño, la tarjeta LORA se puede conseguir mediante tiendas electrónicas.



nivel de inteligencia, solo requiere de dos líneas de señal y un común (Proaño, 2020).

Los display OLED se conectan internamente al ESP32 en los siguientes pines, mostrados en la Figura 32:

OLED (built-in)	ESP32
SDA	GPIO 4
SCL	GPIO 15
RST	GPIO 16

Figura 32: Distribución de los pines de la tarjeta LORA

Fuente: Taracido (2021).

El chip de LORA se comunica mediante el protocolo SPI (Synchronous Peripheral Interface), es utilizado para la comunicación serial entre dispositivos. El SPI fue inicialmente creado por Motorola y adoptado posteriormente por diferentes fabricantes, como Microchip y Atmel, es un enlace de datos en serie, síncrono, y que opera en modo full dúplex, es decir, las señales de datos viajan en ambas direcciones en forma simultánea (Forum, 2020).

Posteriormente del diseño, esto es enviado a la tarjeta LORA, mediante el IDE de Arduino, la salida será el color del semáforo en una intersección, permitiendo que se sincronice a su vez con la siguiente intersección, esto comunicándose entre las dos tarjetas LORA, como se muestra en la Figura 33.

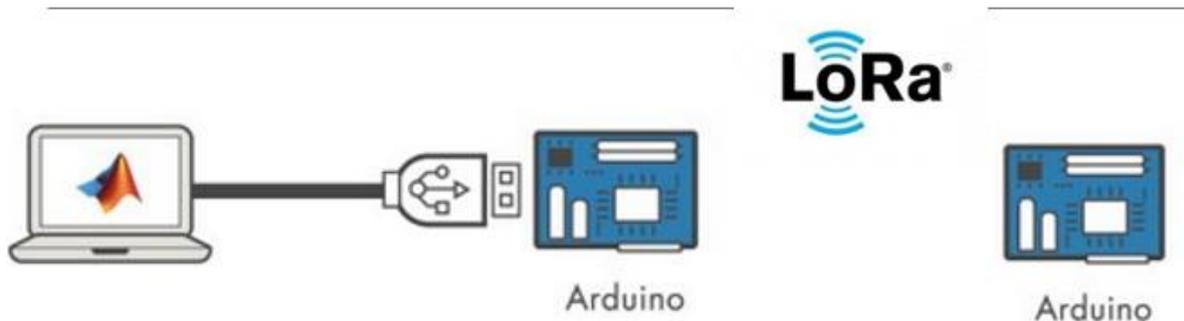


Figura 33: Diseño del envío- recepción entre tarjetas LORA.

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que el uso de las tarjetas LORA, permiten llevar a cabo una conectividad de manera inalámbrica, durante las pruebas de dichas tarjetas se pudo identificar que cuentan con un alcance de más de 20 km, esto hace posible la implementación de esta propuesta, ya que es una tecnología hecha para ser utilizada en ciudades inteligentes, permitiendo una conexión punto a punto, considerando que es una tecnología considerada como económica y fácil de implementar.

Cuando hablamos de una conexión punto a punto se puede decir que no es necesario el uso de un dispositivo intermedio que distribuya la información, ya que la información puede ser enviada directamente entre ellos, recordando la manera de comunicarnos como cuando creamos un teléfono casero, como se muestra en la Figura 34.



Figura 34 Teléfono de latas- tecnología punto a punto  
Fuente: telefono-latas\_51195-2605.jpg (626x626) (freepik.com)

Considerando este tipo de tecnología y con lo antes ya mencionado, se sabe que, en la Dirección de Sustentabilidad Vial de la Ciudad de Toluca, se tienen controladores de tipo C-26, que son los utilizados actualmente en los semáforos de tiempo fijo, razón por la que, si se lleva a cabo las pruebas necesarias con los controladores, poder implementar el uso de esta tecnología para el control de las intersecciones pertenecientes a los semáforos de tiempo fijo en la ciudad.

Es importante dar a conocer que para que el controlador del semáforo pueda funcionar debe ser operado mediante un programador, que es un dispositivo que permite el control de los tiempos y de los ciclos respectivos a cada una de las intersecciones, dichos dispositivos son operados por el personal correspondiente, este dispositivo cuenta con un menú para poder llevar a cabo el cambio de color de cada fase, dependiendo el día de la semana, gracias a esto se puede determinar que en alguno de los días donde existe menor demanda de flujo vehicular, como lo es el día domingo se pueda colocar menor tiempo de color rojo por ejemplificar, siendo así poder dar un plan a cada día y hora dependiendo la demanda.

Sin embargo esto puede volverse una rutina y al mismo tiempo un comportamiento que puede ser transportado a través del uso de las redes neuronales, que nos permiten reconocer e identificar los patrones que se han tomado durante cierto tiempo, hora y día marcado en el programador, es por esto que en este trabajo se presentan conceptos de redes neuronales, de igual manera el software de MATLAB, permite sugerir una red neuronal a implementar, para este caso se puede sugerir la de tipo no supervisada, con la finalidad de que adquiera los patrones correspondientes y poder enviar las señales de lo aprendido entre las tarjetas de manera inalámbrica, siendo otra propuesta la implementación de cámaras en alguno de los cruces, con la finalidad de que si existe algún incidente pueda ser atendido de manera inmediata.

## Conclusiones

La inteligencia Artificial permite imitar la conducta humana para desarrollar una máquina o sistema que utilice amplios datos de ejemplos previos de patrones repetitivos, siendo de forma general un gran campo de estudio, en diferentes ámbitos, el presente trabajo hace uso de ella mediante el uso de redes neuronales en el área de transporte e ingeniería del tránsito, optimizando el tiempo de manipulación de los dispositivos de señalización para el diseño de una sincronización de semáforos que no se encuentran de manera centralizada al centro de control de la Ciudad de Toluca.

Como se menciona en el documento con los datos obtenidos de la Dirección General de Seguridad el total de semáforos centralizados y descentralizados en sus 269 intersecciones, se indagó que 107 son de tiempo fijo, es decir en donde se pretende implementar el diseño que permita sincronizar los semáforos que utilizan el controlador C-26, durante el trabajo se lleva a cabo el planteamiento de solución a la problemática de que los operadores tienen que programar controlador por controlador, es por ello que este trabajo permite brindar el conocimiento para que si en algún momento se quiere retomar la idea plasmada, puede ser usado en este tipo de controlador, debido a que cuentan con una tecnología GPS, misma que permite hacer el uso de alguna tarjeta con tecnología inalámbrica y con un entrenamiento con el uso de redes neuronales logre tener un correcto funcionamiento mediante el uso incluso de un concentrador (hub) que permita enlazar varias intersecciones, llegando a un punto.

El uso del software MATLAB, es de gran ayuda para llevar a cabo los elementos necesarios para ser implementados, ya que permite la creación de las máquinas de estado, mediante su toolbox SIMULINK, permitiendo también la creación de una red neuronal, que permita entrenar la sincronización de las intersecciones estudiadas en este trabajo, durante el desarrollo se consideró una tarjeta LORA, que cuenta con tecnología inalámbrica, que permitirá llevar a cabo la sincronización de semáforos en las diferentes intersecciones.

Este trabajo permitió dar a conocer que la Inteligencia Artificial es capaz de lograr que un semáforo que cuenta con un sistema temporizado para hacer el cambio de estado, sigue un patrón de secuencia que ya no sea fija, sino que pueda ser centralizado con el uso de la tecnología mencionada durante este documento, considerando el uso de redes neuronales para tener un entrenamiento respecto a los patrones a seguir en el cambio de luces de los semáforos que se encuentran en la Ciudad de Toluca.

Derivado de esto concluyo que este trabajo es sólo una aportación para que pueda ser implementado en el uso de algún microcontrolador como el C-26, al cual le pueda ser colocado un dispositivo de radiofrecuencia, permitiendo así la conectividad entre las intersecciones, permitiendo que esto pueda ser visto en una central y así poder implementar una red de semáforos en tiempo real, podría incluso ser monitoreado por cámaras en algunos puntos estratégicos de algunas intersecciones de la ciudad de Toluca, obteniendo como resultado que los operadores de semáforos puedan tener un mayor control de la sincronización de los mismos, mediante la tecnología inalámbrica propuesta.

## Glosario

**Entrenamiento:** Procedimiento utilizado para llevar a cabo el proceso de aprendizaje en una red.

**Interfaz:** Dispositivo capaz de transformar las señales generadas por un aparato en señales comprensibles por otro.

**Led:** Diodo emisor de luz.

Lora: Tecnología de transmisión inalámbrica.

**Matlab:** Sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.

**Neurona:** Célula del sistema nervioso formada por un núcleo y una serie de prolongaciones, de las cuales una es más larga que las demás.

**Protocolo de Comunicación:** Conjunto de pautas que posibilitan que distintos elementos que forman parte de un sistema establezcan comunicaciones entre sí, intercambiando información.

**Red neuronal artificial:** Redes interconectadas masivamente en paralelo de elementos simples y con organización jerárquica.

**Semáforo de Tiempo fijo:** Dispositivo para el control del tránsito que regula la circulación haciendo detener y proseguir el tránsito de acuerdo a una programación de tiempo determinado o a una serie de programaciones establecidas.

**Simulink:** Es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab

**Stateflow:** Es un flujo observable contenedor de estados que emite actualizaciones de estado actuales y nuevas a sus compiladores. El valor de estado actual también se puede leer a través de su propiedad.

**Wifi:** Tecnología que permite conectar diferentes equipos informáticos a través de una red inalámbrica de banda ancha.

## Índice de Figuras

<i>Figura 1:</i> Primer semáforo de la historia en Barcelona. Fuente: (Permanyer, 1929). .....	15
<i>Figura 3:</i> Gabinete de la Unidad de Control. ....	23
Fuente: Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad (SCT,2014). ....	23
<i>Figura 4:</i> Estructura interna de un microcontrolador en un chip. Fuente: Microcontroladores PIC (Verle M, 2009). ....	23
<i>Figura 5:</i> Diagrama de bloques general de un microcontrolador. Fuente: Microcontroladores fundamentos y aplicaciones con PIC. ....	24
<i>Figura 6:</i> Oscilador generador de pulso. Fuente: Microcontroladores PIC. Verle M (2009). ....	25
<i>Figura 7:</i> Diagrama de una neurona genérica. Fuente: Jaime Torral Barrera (2021). ....	26
<i>Figura 8:</i> Salto sináptico. Fuente: (Saavedra, 2018) .....	27
<i>Figura 9:</i> Modelo de una red neuronal artificial. ....	27
Fuente: Jaime Torral Barrera (2021). ....	27
<i>Figura 10.</i> Entrenamiento de una red neuronal artificial. Fuente: Olabe (2021) .....	31
<i>Figura 12:</i> Secuencia de fases. ....	33
Fuente: Cal y Mayor (1994). ....	33
<i>Figura 11:</i> Fase de semáforos .....	33
Fuente: Cal y Mayor (1994). ....	33
<i>Figura 13:</i> Modelo básico del flujo de saturación. ....	36
Fuente: Akcelik Rahmi (1989). ....	36
<i>Figura 14:</i> Intersección Tipo T. ....	37
Fuente: Patiño (2016). ....	37
<i>Figura 15:</i> Intersección Tipo Y. ....	38
Fuente: Patiño (2016). ....	38
<i>Figura 16:</i> Intersección Tipo cruz. ....	38
Fuente: Patiño (2016). ....	38
<i>Figura 17:</i> Intersección Tipo X .....	39
Fuente: Patiño, 2016. ....	39

<i>Figura 18:</i> Intersecciones múltiples Tipo X.....	39
Fuente: Patiño (2016).....	39
<i>Figura 19:</i> Intersección Desfasada.....	40
Fuente: Patiño (2016).....	40
<i>Figura 20:</i> Intersección giratoria.....	40
<i>Figura 21:</i> Flujo promedio de viajes diarios.....	42
Fuente: Centro Mario Molina (2012).....	42
<i>Figura 22:</i> Intersecciones con semáforos de tiempo fijo en Toluca.....	45
Fuente: Dirección General de Seguridad Pública, (2021). ....	45
<i>Figura 23:</i> Offset.....	47
Fuente: Gómez Hernández, (2009).....	47
<i>Figura 24:</i> Máquina de estados de un semáforo. ....	48
Fuente: SEPI-ESIME-ZAC, microcontroladores, (2015).....	48
<i>Figura 25:</i> Máquina de estados de un semáforo en Simulink.....	49
Fuente: Elaboración propia, utilizando Matlab Simulink(2021).....	49
<i>Figura 26:</i> Cambio de luces utilizando Simulink. Fuente: Elaboración propia, utilizando Matlab Simulink(2021).....	49
<i>Figura 27:</i> Placa Arduino. Fuente: Fernández Yúbal, (2020) .....	50
<i>Figura 28:</i> Código de simulación de un semáforo. Fuente: Martínez Mendoza, (2015).....	51
Fuente: Elaboración propia, (2021). ....	52
<i>Figura 30:</i> Antena de la tarjeta LORA .....	53
Fuente: Elaboración propia, (2021). ....	53
<i>Figura 31:</i> Distribución de los pines de la tarjeta LORA .....	53
Fuente: Taracido (2021). ....	53
<i>Figura 32:</i> Distribución de los pines de la tarjeta LORA .....	54
Fuente: Taracido (2021). ....	54
<i>Figura 33:</i> Diseño del envío- recepción entre tarjetas LORA.....	55
Fuente: Elaboración propia .....	55
<i>Figura 34</i> Teléfono de latas- tecnología punto a punto	
Fuente: telefono-latas_51195-2605.jpg (626x626) (freepik.com).....	55

## Referencias

- Anderson, J. A. (2007). *Redes Neuronales*. México: ALFAOMEGA.
- Angúlo Movilla Daniel, G. D. (2022). Diseño metodológico de un sistema de semáforos inteligentes para la reducción de tráfico vehicular . *Sextante*.
- Anoroza, M. M. (2020). *Semáforos Inteligentes*. Asunción, Paraguay.
- Barrera, J. A.-T. (2021). *Redes Neuronales*. Obtenido de *Redes Neuronales*: [http://www.cucei.udg.mx/sites/default/files/pdf/toral\\_barrera\\_jamie\\_areli.pdf](http://www.cucei.udg.mx/sites/default/files/pdf/toral_barrera_jamie_areli.pdf)
- Bosch Matas, A. (2022). *Diseño de un nuevo concepto de semáforos*. Barcelona.
- Cando, D. (2017). *DISEÑO Y PROTOTIPO DE SISTEMA INTELIGENTE PARA SEMÁFOROS*.
- Castro Quishpe, M. (2022). *Desarrollo de un prototipo de semáforo inteligente con visión por computador*. Ecuador.
- Cocimec. (2020). *CATALOGO COCIMEC*. Obtenido de *CATALOGO COCIMEC*: <http://www.cocimec.com.mx/pdf/2017.08.03%20Catalogo%20Semaforos%20COCIMEC.pdf>
- Danny Jose Reyes Jarrín, J. K. (2019). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SEMÁFORO*. GUAYAQUIL.
- Dorantes Flores Alan E, R. E. (2022). *Autonomous Monitoring System for a Smart Traffic Light, through Free Design Platforms*. *investigium*.
- Fernández, Y. (2020). *xacata basics*. Obtenido de *xacata basics*: <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>
- Forum. (2020). *punto flotante S.A.* Obtenido de <https://www.puntofotante.net/COMUNICACION-SPI-TUTORIAL.htm>
- Gómez Hernández, E. (2009). *Desarrollo de un Modelo de Simulación Vehicular para la Mejora en la Sincronización de Semáforos*.
- Gómez, C. V. (2020). *El inicio y la transformación de los semáforos en la CDMX*. *UNIVERSAL*, pág. 3.

- Guzmán Avendaño, F. (2022). Semáforos inteligentes con redes neuronales convolucionales.
- IBM, M. B. (04 de MARZO de 2021). *IBM*. Obtenido de IBM: <https://www.ibm.com/docs/es/bpm/8.5.7?topic=types-state-machines>
- Manzo Cruz Francisco, A. H. (enero de 2019). Sistema de Semáforos Inteligentes para el Control de Tráfico Vehicular. Toluca.
- Martínez, J. R. (1995). *Redes Neuronales Artificiales*. España: ra-ma.
- MathWorks. (2020). *MathWorks*. Obtenido de MathWorks: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- MathWorks. (2021). *MathWorks*. Obtenido de MathWorks: <https://es.mathworks.com/help/stateflow/simulation-in-simulink.html>
- Matich, D. J. (2001). *Redes Neuronales: Conceptos Básicos*.
- Matich, D. J. (2021). Redes Neuronales. En D. J. Matich, *Redes Neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones. Cátedra de Informática Aplicada a la Ingeniería de Procesos–Orientación I*.
- Mendoza, F. M. (2015). *OpenWebinars*. Obtenido de <https://openwebinars.net/blog/tutorial-arduino-ejemplo-semaforo/>
- Molina Navarro Antonio, Z. C. (2016). Los semáforos inteligentes en la logística urbana sustentable. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*.
- Molina, C. M. (2014). *Movilidad Sustentable para el Valle de Toluca*.
- Moncada, M. (2020). *slideshare*. Obtenido de Construcción de semaforo: <https://es.slideshare.net/MariangelMoncada/el-semforo-y-sus-funciones>
- Moreno Román, A. (2022). Las técnicas de inteligencia artificial aplicadas al control y configuración del tráfico. *RENIA*.
- Olabe, X. B. (2019). Redes neuronales artificiales y sus aplicaciones. Bilbao, EHU, Bilbao.
- Patiño, J. M. (2016). *USO DE LA SIMULACIÓN PARA MEJORAR LA MOVILIDAD VEHICULAR EN LOS*.

- Permanyer, L. (1929). Asi nacio el primer semaforo. *El Aldom*.
- Proaño, K. V. (2020). Comunicacion I2C. Ecuador.
- RACE. (2020). Tipos de semaforos.¿Que significan cada uno?
- Rafael Cal y Mayor Reyes, J. C. (1994). *Ingenieria de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones*.
- Raquel Florez Lopez, J. M. (2008). *Las Redes Neuronales Artificiales Fundamentos teoricos y aplicaciones prácticas*. España: netbiblo.
- Resendez, D. (1989). capitulo 3. En D. Resendez, *El rompecabezas de la ingenieria* (pág. 300).
- Saavedra, F. I. (2018). Redes Neuronales Artificiales. En F. I. Saavedra, *Redes Neuronales Artificiales*.
- Salas Laureano Martha Susana, V. S. (17 de 11 de 2021). Propuesta De Implementación De Semáforos Inteligentes Para Una Mejora En La Transitabilidad De La Av. José Gálvez En La Ciudad De Chimbote. Perú.
- Samaniego Calle Víctor, V.-L. M.-W.-G.-F. (2019). Semáforos inteligentes y tráfico vehicular: un caso de estudio comparativo para reducir atascos y emisiones contaminantes. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*.
- Sánchez, R. J. (2013). *CONTROL DEL TRÁFICO VEHICULAR POR MEDIO DE SEMAFOROS INTELIGENTES*. MARACAIBO.
- SEMEX. (2020). *CATALOGO DE SEMEX*. Obtenido de CATALOGO DE SEMEX:  
<http://www.semex.com.mx/catalogo.pdf>
- Tacuar. (2020). *TACUAR*.
- Toyota. (2020). *Espacio Toyota*. Obtenido de Sabes como funciona un semaforo:  
<https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/sabes-como-funciona-un-semaforo>
- Transportes, S. d. (2014). *SCT*. Obtenido de SCT:  
[http://sct.gob.mx/normatecaNew/wp-content/uploads/2021/09/ManualSenalamientoVialDispositivosSeguridad\\_2014-1.pdf](http://sct.gob.mx/normatecaNew/wp-content/uploads/2021/09/ManualSenalamientoVialDispositivosSeguridad_2014-1.pdf)

## ANEXOS

### Entrevista realizada al personal de la Dirección General de Seguridad.

Fecha de realización: 07 de octubre de 2020.

1.- ¿Cuál es el procedimiento de programación de los semáforos de tiempo fijo?

R.-La programación se lleva a cabo mediante los controladores C-26, estos cuentan con un pequeño display, que cuenta con un menú de opciones, mismos que son programados según los días de la semana y los horarios determinados, previo a un estudio de tránsito.

2.- ¿Cuál es el número de intersecciones en este caso?

R.- Son 269 intersecciones centralizadas y descentralizadas y 107 son de tiempo fijo.

3.- ¿Cuáles son las intersecciones?

R.-Se muestra un mapa en el capítulo II con las intersecciones de tiempo fijo.

4.- ¿Cuáles son las desventajas de los semáforos de tiempo fijo?

R.- Que los operadores deben programar de manera manual, para que puedan funcionar, en caso de que alguno se dañe el personal de la central debe esperar a que sea reportado por los ciudadanos de la ciudad de Toluca, que no se encuentran en el sistema centralizado y ya son aparatos demasiado antiguos.

5.- ¿Se ha pensado en centralizarlos?

R.-Si, pero el costo es elevado, también se debe considerar el mantenimiento y las actualizaciones correspondientes.

6.- ¿Cuál es el costo para lograr la implementación?

R.- Más de un millón de pesos.

7.- ¿Qué pasaría si se pudiera implementar con el uso de tecnología wifi?

R.- Pudiera permitir la centralización, implicando un mejor control de los semáforos que se encuentran en ese estado, así como el manejo de la programación de los mismos desde un punto de acceso, es decir desde un centro de control como se hace actualmente con algunas intersecciones, también que, al dañarse una lámpara, que es de las situaciones que llegan a ocurrir se puedan atender de manera pronta sin esperar a que la ciudadanía lo haga saber.

## Ficha Técnica del Controlador C-26

Sincron

Tarjeta de sincronía GPS para controladores de semáforos modelo C26<sup>®</sup>, marca SEMEX, basada en tecnología GPS (Global Positioning System).

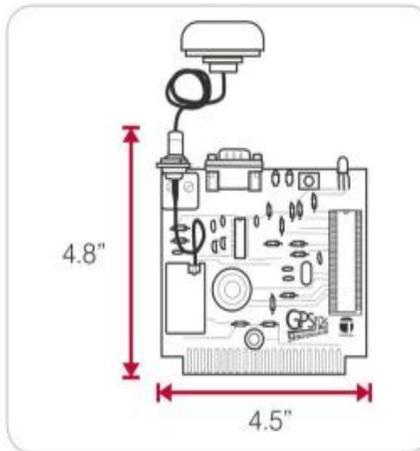
El GPS26 genera la señal de pulso de sincronía y la antena recibe los datos de fecha y hora directo de los satélites.

### CARACTERÍSTICAS GENERALES

- Tarjeta modular de 4.8" x 4.5".
- Antena GPS tipo Anti-Vandalismo con cable coaxial de 30 cms.
- Componentes de alto rango de temperatura y tecnología "Thru Hole".
- Capacidad para aplicar hasta 3 ciclos por día.
- 99 eventos (semanal).
- Cuenta con un supercapacitor de respaldo de energía para mantener la hora exacta en caso de fallas en la red eléctrica.
- Manuales de instalación y programación incluidos.

### VENTAJAS

- Fácil instalación dentro del mismo gabinete.
- No necesita gastar en nuevos controladores.
- Baja inversión en tecnología de punta.
- No hay necesidad de constantes reajustes en el tiempo.



Programable con: **PRO26**  
PROGRAMADOR DE CONTROLADORES