

Sistema Centralizado de Sincronización de Semáforos Inalámbricos Solares

Ramses Miramontes Meza, Maria Elisa Álvarez Aguilar, Carlos Alberto Torres Martínez, Raúl Uzias Rentería Flores, José Alberto Ibarreche Baltazar, Uvaldo Simon Martínez Ríos, Carlos Ignacio Moreno Salazar, Héctor Morales Ruvalcaba
TAIRDA INNOVATIONS S.A de C.V. Colima, Col. México
ramses7083@gmail.com

RESUMEN

El Sistema Centralizado de Sincronización de Semáforos Inalámbricos Solares fue desarrollado como una solución que ayude a las ciudades a reducir el tráfico vehicular y al mismo tiempo ahorrar gracias a los bajos costos de implementación, mantenimiento y consumo energético. El sistema está compuesto por semáforos inalámbricos solares, una aplicación para dispositivos móviles y un sistema web que interactúan entre sí mediante protocolos de comunicación y algoritmos de control propietarios. Para el desarrollo de los semáforos inalámbricos solares se diseñó un controlador que cumpliera los estándares y normativas internacionales; el controlador integra como característica adicional módulos de comunicación inalámbrica en las bandas de los 2.4 GHz y 900 MHz, así como tecnología Sistema de Posicionamiento Global (GPS), esto con el fin de generar una red de semáforos sincronizada la cual pueda ser monitorizada, gestionada y reprogramada de forma remota. También se agregó un módulo de generación, almacenamiento y gestión de energía fotovoltaica, que posibilita al semáforo operar de forma autónoma a la red eléctrica.

La aplicación web del sistema centralizado permite al usuario realizar la monitorización, gestión y reprogramación de la red haciendo uso de una interfaz gráfica de usuario (GUI). El sistema centralizado además notifica al usuario de fallas dentro de la red (lámpara fundida, batería baja, nodo sin conexión) con el fin de mejorar los tiempos de respuesta en mantenimiento y atención al sistema. También se desarrolló una aplicación para dispositivos móviles que permite a vehículos de emergencia (ambulancia, policía, bomberos, protección civil) circular de forma eficiente y segura por la ciudad al momento de atender una emergencia, determinando la mejor ruta en la aplicación en base a tiempo/distancia reduciendo el tiempo de tránsito de 15% a 40% según el escenario de aplicación.

Palabras Clave: Control centralizado de semáforos, sistema de semáforos en tiempo real, semáforos inalámbricos, semáforos solares, seguridad ciudadana.



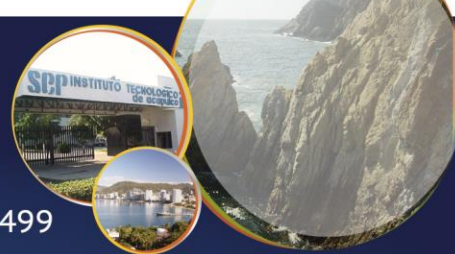
1. INTRODUCCIÓN

Algunos datos publicados por parte de diferentes países demuestran el impacto ocasionado por el tráfico vehicular, Estados Unidos estimó que en el año 2014 el costo fue de \$160 billones de dólares y sus habitantes consumieron 3.1 billones de galones de combustible y 6.9 billones de horas extra debido a este problema [1]. A la Unión Europea le costaría 2% de su crecimiento del producto doméstico para el 2020 [2]. Con respecto a impactos ambientales, la Agencia Europea del Medio Ambiente presentó un reporte técnico donde mostró que en el 2004 el transporte terrestre generó 26% de las emisiones de gas de efecto invernadero [2]. La Comisión para la Seguridad Global de las Carreteras mostró que las muertes por accidentes viales son de al menos 1.3 millones de personas por año y 50 millones de lesionados [3].

De acuerdo con el Índice TomTom (Índice de tráfico vehicular), los habitantes de la Ciudad de México pasan 57 minutos extra al día en el tráfico, esto la convierte en la ciudad con más congestión vehicular en el Índice de Tráfico 2016 que mide 174 ciudades de 38 países en el mundo [4],[5]. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) se estima que los accidentes viales en el mundo alcanzarán 2.4 millones en 2030 [5]. Los elevados costos que producen los accidentes hace prioritario implementar medidas de seguridad que reduzcan de forma significativa la pérdida de vidas humanas así como los gastos derivados de los recursos materiales dañados o perdidos en los accidentes.

Tan solo durante el año 2007 en México 5,398 personas murieron y 33,580 resultaron lesionadas en accidentes en las carreteras Federales y el costo de un lesionado en promedio es de aproximadamente US \$90,611 [6]. En la actualidad existen alrededor de 7 mil millones de habitantes en el mundo y cada vez es más necesario adquirir un vehículo como medio de transporte, en el año 2010 un estudio publicado en AF medios destacó las tres principales ciudades con mayor cantidad de vehículos por persona, teniendo a los Ángeles en primer lugar con 577 vehículos por cada 1000 personas, a Londres en segundo con 413 y a Colima en el tercer lugar con 385 [7]. Este escenario genera mayores concentraciones de contaminación en urbes y contribuye a las demoras vehiculares ocasionando problemas o deficiencias en la logística de tránsito, afectando las rutas de movilidad vial en general, incluyendo a las más sensibles como lo son las instituciones de servicios sociales como hospitales, departamentos de bomberos, policía, protección civil entre otros.

Por otra parte la expansión de las ciudades nos apremia a incluir tecnologías de gestión de tránsito que cubran no solo el desarrollo urbano emergente, sino que también ayuden a incorporar esta tecnología en el desarrollo urbano existente. Por tanto, se ha detectado una oportunidad en el área de control de tránsito vehicular específicamente en el área de seguridad



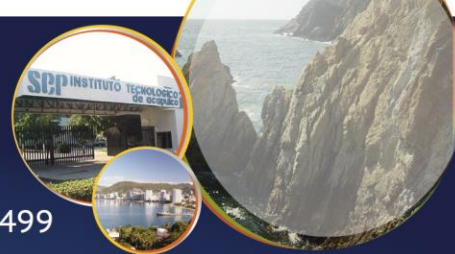
ciudadana apoyando la logística de movilidad para instituciones de apoyo social así como la incorporación de tecnología de tráfico de manera gradual en las ciudades y regiones. Esta oportunidad consiste en desarrollar un Sistema Centralizado de Sincronización de Semáforos Solares, para realizar la gestión y control de estrategias de flujo vial para la ciudadanía y para los servicios públicos de emergencia de salud y seguridad. Este sistema puede ser programado para tomar decisiones tomando en cuenta las necesidades y características de su punto de ubicación a través de una red de semáforos energizados con paneles fotovoltaicos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

El Sistema Centralizado de Sincronización de Semáforos Inalámbricos se compone de semáforos inalámbricos solares, una aplicación para dispositivos móviles y un sistema web que interactúan entre sí mediante protocolos de comunicación y algoritmos de control que conforman el sistema centralizado, tal como se puede observar en la figura 1.



Figura 1: Esquemático de Interacción de componentes del Sistema Centralizado de Sincronización de Semáforos Inalámbricos Solares. A) Diagrama de interacción del sistema con vehículos de emergencia. B) interfaz del sistema centralizado. C) interfaz de la aplicación móvil.



El sistema centralizado SICCESIS está compuesto principalmente por 3 sistemas definidos, el primero es el sistema de interacción entre semáforos en un nodo, el cual está compuesto por un maestro y un número definido de esclavos, el esclavo maneja una comunicación con el maestro el cual indica los estados que presentara el esclavo, mientras que el maestro presenta el control del estado de los esclavos así como de sí mismo, el maestro además mantiene una comunicación inalámbrica con el sistema centralizado para permitir la reprogramación y control del nodo de manera inalámbrica, cabe destacar que cada semáforo cuenta con su propio sistema de alimentación solar así como el hardware diseñado para cumplir las funciones requeridas de los semáforos.

El segundo sistema principal es el del sistema centralizado, el cual costa de una aplicación diseñada y la comunicación inalámbrica con el maestro de cada intersección, la aplicación diseñada permite al usuario de manera accesible e intuitiva el control e inspección de los semáforos en las intersecciones, permitiendo una sincronización inalámbrica, además de permitir la aplicación e algoritmos para reducción de tiempo de traslado de los vehículos de emergencia la cual se explicara a continuación, la comunicación inalámbrica con los semáforos maestros de cada intersección se realizara con un algoritmo de enrutamiento híbrido, el cual garantiza que en caso de algún desperfecto de un maestro el sistema siga en funcionamiento además de reportar de manera inmediata el requerimiento de mantenimiento en la intersección que presenta un fallo.

El tercer sistema es la aplicación móvil, la cual presenta las características de ser intuitiva y visual, cabe destacar que el acceso a esta aplicación es restringida y solamente será proporcionada por los administradores del sistema centralizado a ciertas personas que ejerzan como conductores u operadores de vehículos de emergencia, la cual se comunica con el sistema centralizado enviando la ubicación del vehículo de emergencia y el destino que el usuario ingrese, con lo cual el sistema centralizado creara una ruta óptima para el traslado del vehículo de emergencia, la cual será enviada al conductor y presentada por medio de la aplicación de manera visual, el sistema centralizado manipulara los semáforos de las intersecciones para reducir el tiempo de traslado de los vehículos de emergencia.

El sistema está diseñado con la característica de ser inalámbrico con la finalidad de reducir costos en su instalación y mantenimiento, además de permitir una escalabilidad de forma simple al agregar o quitar nodos desde una administración de una red que generan los cruces de semáforos. Cada semáforo cuenta con un módulo de generación y almacenamiento de energía solar con el fin de garantizar la operación de la red de semáforos en casos de falla en la red eléctrica de la ciudad, así como la reducción de costos de operación de los semáforos. Como los semáforos interactúan de forma inalámbrica y cuentan con un suministro de energía individual aislado de la red, se evita la necesidad de generar una red cableada para la operación



del sistema centralizado. Esto permite la reducción de costos en infraestructura e instalación para la creación del sistema Centralizado de Sincronización.

Al contar con un sistema centralizado se plantea el diseño de una aplicación web del sistema centralizado el cual permite al usuario realizar la monitorización, gestión y reprogramación de la red haciendo uso de una interfaz gráfica de usuario (GUI). El sistema centralizado notifica al usuario de fallas dentro de la red (lámpara fundida, batería baja, nodo sin conexión) con el fin de mejorar los tiempos de respuesta en mantenimiento y atención al sistema. Para la aplicación del algoritmo de reducción de tiempos de atención en vehículos de emergencia, desarrolló una aplicación para dispositivos móviles que permite la conexión a vehículos de emergencia (ambulancia, policía, bomberos, protección civil) y presenta una comunicación con el sistema centralizado el cual tomara en consideración la ubicación inicial del vehículo de emergencia y el destino.

Posteriormente enviara la ruta a la aplicación realizando una retroalimentación de la ubicación del vehículo, buscando que la mayoría de los semáforos se encuentren en verde para cuando el vehículo en el momento que el vehículo de emergencia transite por la intersección. Para el desarrollo del diseño mecánico se utilizó el software de diseño INVENTOR 2016 con el cual gracias a las herramienta provista por el software se desarrolló el diseño CAD del controlador de semáforos, en el cual se consideraron estándares internacionales (American National Standards Institute (ANSI) e International Standards Organization (ISO)) con el fin de garantizar el cumplimiento de regulaciones aplicables [6], se realizó una búsqueda de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) vigentes en el cual se localizaron las regulación que deben de cumplir las unidades de control de los semáforos, la norma NMX-J-152 se refiere a protecciones de aislación térmica, resistencia a la humedad, protección contra choques eléctricos , espaciamientos eléctricos etc.

El controlador se diseñó con una estructura mecánica que cumple con los entandares antes mencionados y que as u ves cumple con los estándares IP 65, ya que el gabinete se encuentra expuesto a factores ambientales. El resultado de la etapa de diseño mecánico se presenta en la en el cual se muestra una Renderización del diseño CAD y una fotografía de uno de los semáforos reales fabricados.

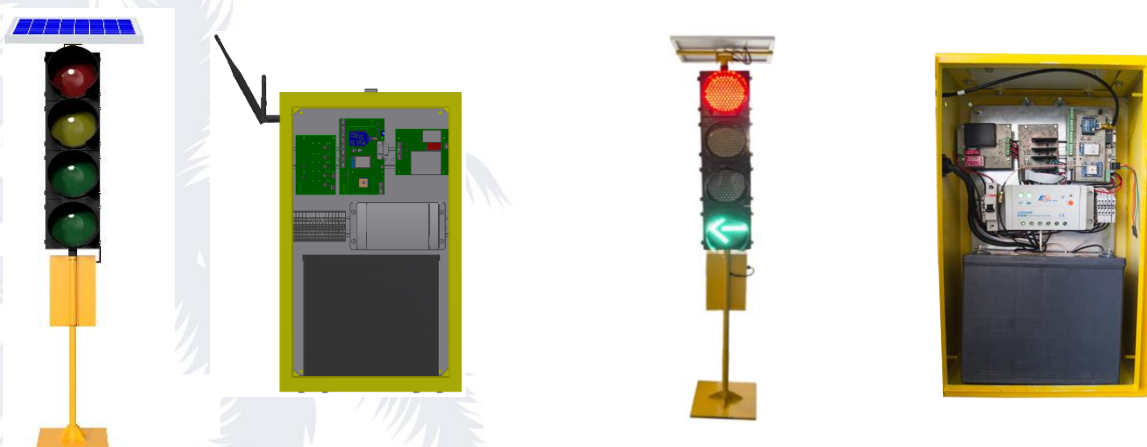


Figura 2: Resultado de la etapa de diseño mecánico del controlador de semáforos. A) Renderizado de estructura del semáforo. B) Renderizado de gabinete de control semáforo. C) fotografía de estructura del semáforo. D) imagen de gabinete de control.

Durante el desarrollo de la etapa del diseño electrónico se utilizaron componentes de calidad industrial, el desarrollo de la parte electrónica del controlador de semáforos se estableció para funcionar de forma modular segmentando el controlador de acuerdo a su funcionamiento en 4 módulos. El primero es el módulo de comunicación inalámbrica cuya PCB (Printed Circuit Board) incluye dos transceptores de radiofrecuencia uno para transmitir información entre cruces de semáforos (900 MHz) y para realizar la comunicación entre miembros de un cruce de semáforos (2.4 GHz), cada controlador de semáforos cuenta con un módulo de posicionamiento global (GPS) para la sincronización de tiempos entre semáforos así como para realizar un mapeo de los cruces en el sistema centralizado de control.

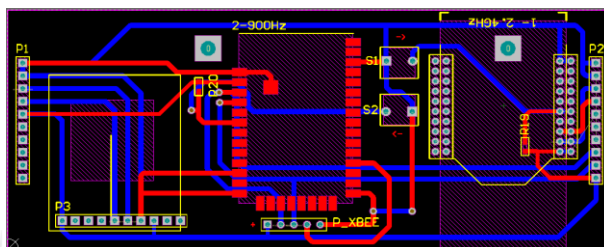


Figura 3: PCB de módulo de comunicación electrónica de controlador de semáforos.

El segundo módulo es la etapa de gestión de energía, el cual recibe la energía generada por el un sistema de alimentación fotovoltaica y realiza una conversión mediante reguladores tipo buck-boost para alimentar a los distintos dispositivos de comunicación así como al microprocesador, cabe mencionar que en este mismo modulo se incluye a etapa de suministro



de energía a las luminarias junto con sus fusibles correspondientes con los cuales se garantiza una protección del sistema, este módulo suministra los siguientes voltajes: +3.3V, +5V y +12V necesarios para la operación de los distintos elementos del controlador de semáforos.

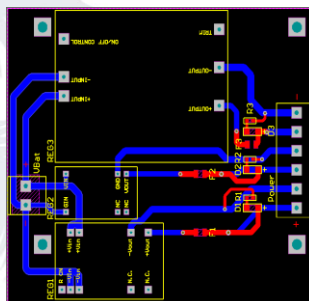


Figura 4: PCB de módulo de gestión de energía.

El tercer módulo es el módulo de control el cual se encarga del procesamiento y gestión de la información recibida por el sistema de comunicaciones, así como de monitorizar el funcionamiento del semáforo, implementar el protocolo de comunicación como maestro o como esclavo dependiendo de la función del semáforo, además de incluir una tarjeta de memoria extraíble en la cual se pueda reemplazar en caso de reprogramación del semáforo.

Este módulo es el cerebro de cada uno de los semáforos por lo cual al ser de vital importancia se establecieron sistemas de protección independientes, se utilizó un microcontrolador con arquitectura de 16 bits operando a 32 MHz de la empresa Microchip (24FJ256GA110) el cual cumple con los requerimientos de velocidad de procesamiento, así como de periféricos necesarios para la operación dentro de estándares en el desarrollo de controladores de semáforos.

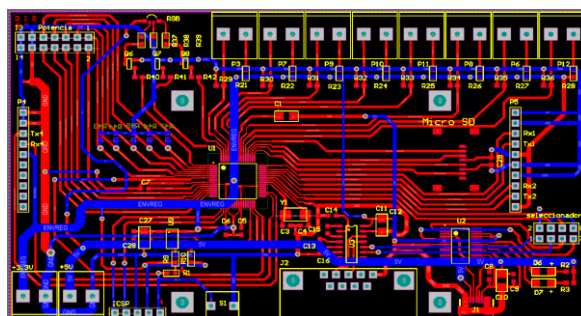


Figura 5: PCB de módulo de control.

El cuarto módulo es el módulo de electrónica de potencia, este módulo se conforma de los actuadores, protecciones y electrónica de control necesaria para operar las lámparas de los



semáforos. Debido a que el sistema está pensado para funcionar de forma aislada y alimentado de forma solar, el módulo de potencia suministra salidas de +12Vdc para las lámparas LED, cuyo consumo nominal de corriente es de 0.4A por luminaria.

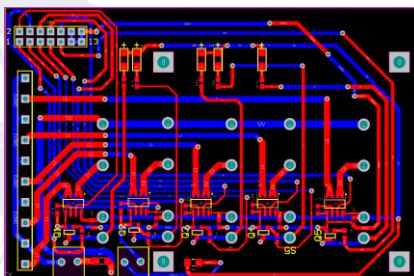


Figura 6: PCB de módulo de potencia.

El conjunto de los cuatro módulos se implementarán en el gabinete de control del semáforo el cual cumple con las normas IP65 para protección a factores medioambientales como los son el polvo y la humedad, el arreglo de los módulos dentro de los gabinetes es diseñado para ser accesible para el personal que se encargue de dar mantenimiento y comprobar el estado del sistema contemplando un espacio para trabajo accesible así como posibilidad de remplazo de un módulo completo por refacciones de esta manera el tiempo de un mal funcionamiento del semáforo es reducido, el gabinete con todos los módulos mencionados se muestran en la figura 6, en la cual se puede observar cómo cada uno de los elementos son intercambiables para de esta manera tener un sistema de fácil mantenimiento.

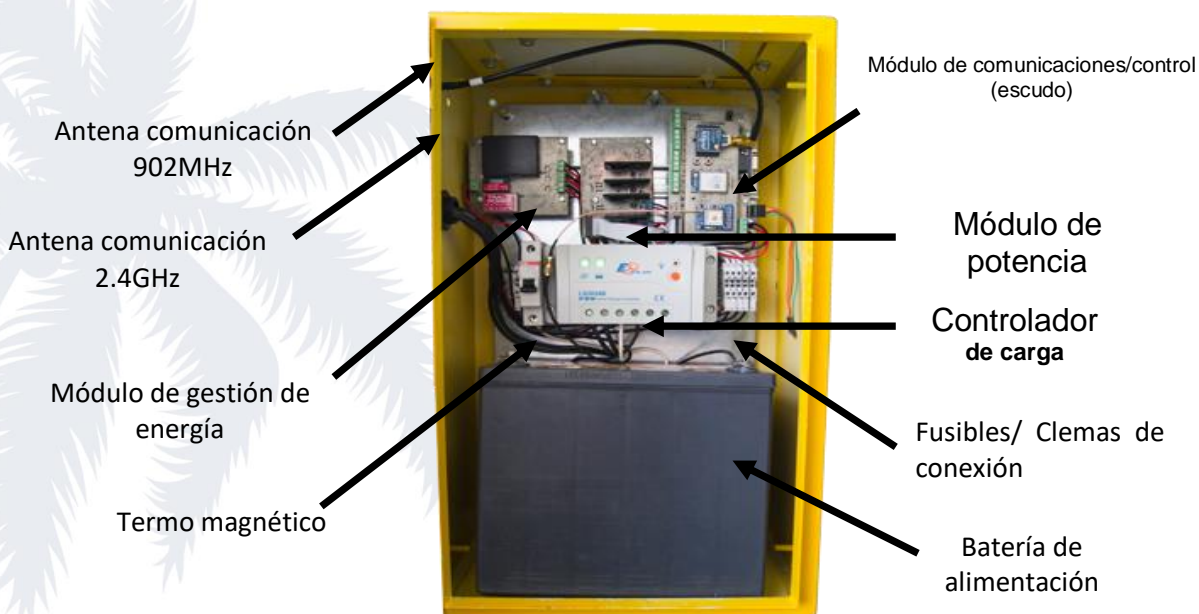
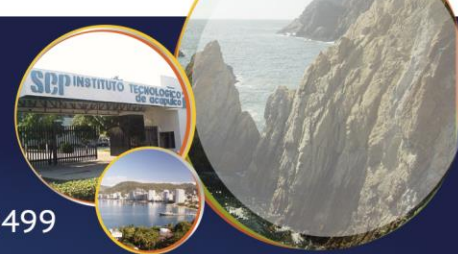


Figura 5: Componentes principales del gabinete del controlador de semáforos inteligentes.

Una vez terminada la etapa de diseño electrónico se procedió con programación del sistema, como herramienta de programación se utilizó el software de programación MPLAB-IDE, el cual incorpora todas las utilidades necesarias para la realización de cualquier proyecto, el programa permite editar el archivo fuente en lenguaje ensamblador, así como simularlo en la pantalla y ejecutarlo paso a paso y observar cómo evolucionan en tiempo real sus registros internos, la memoria RAM y/o EEPROM, por lo cual permite realizar la programación necesaria para la realización del sistema, el sistema principalmente está compuesto por 4 etapas, la primera es el desarrollo firmware del controlador del semáforo, el cual tiene como función la gestión del cambio de estado de los aspectos del semáforo (verde, rojo, amarillo, flecha) además de verificar el correcto funcionamiento de estos midiendo los sensores de corriente implementados en el hardware y de esta manera comprobar las condiciones de operación de las lámparas coincide con el patrón programado además se ejecuta un ciclo de comprobación de estado del semáforo en el cual se mide las condiciones actuales de los diferentes elementos del semáforo, tales como el estado de las luminarias en cuestión de un cortocircuito, elementos leds de la luminaria que se encuentran deshabilitados, en el cual si se detectan estos factores el semáforo se configura a actuar en modo recesivo y mandar una alerta a la unidad centralizada.



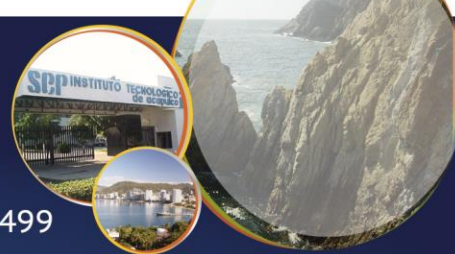
La comprobación de la integridad del gabinete de control es crucial para garantizar el correcto funcionamiento del semáforo, por lo tanto se miden las condiciones de humedad y temperatura dentro de este, al presentarse algún valor fuera del parámetro establecido se manda una alerta para realizar una comprobación de la integridad del gabinete, la condición de que el gabinete este protegido contra factores medioambientales no significa que una persona externa pueda buscar la manipulación del sistema, para evitar este evento ocurra se provee de un sistema de seguridad de una llave única con la cual solo tendrá acceso el cliente, cabe mencionar que si el gabinete es forzado se mandara una señal de alarma al sistema centralizado para poder alertar a las autoridades correspondientes.

El sistema de alimentación solar es un elemento importante del sistema ya que esto permite una disminución en el costo de operación energético que afecta a la ciudadanía, pero en consecuencia el sistema requiere un mantenimiento periódico con objetivo de garantizar su funcionamiento de manera eficiente, por lo cual se creó una función cíclica en el cual cada cierto intervalo de tiempo programable se comprueba diferentes elementos como el estado del centro de carga, la degradación del acumulador de energía solar y el estado del panel solar proporcionando información para realizar un mantenimiento preventivo, garantizando del aprovechamiento de la energía solar de manera continua.

La segunda etapa se realizó el programa encargado de la comunicación de los semáforos en un cruce, el primer paso fue el desarrollo del firmware que permite al microcontrolador enlazarse con los medios de comunicación inalámbrica mediante el protocolo IEEE 802.15.4 esto permite al sistema la comunicación entre semáforos de una manera eficiente, se realizaron y programaron funciones en el microcontrolador que permitieran el procesamiento de información recibida por los canales de comunicación, así como interrupciones que habilitan el funcionamiento de las alertas mencionadas en el programa anterior.

El segundo paso fue el desarrollo e implementación de un protocolo de comunicación que permitiera la sincronización entre los semáforos en una intersección, se tomó la decisión de manejar un protocolo de un maestro en cada cruce, el cual realizara la función de control de cambio de aspecto de los demás semáforos (esclavos), así como ser el encargado de la comunicación entre intersecciones y con el sistema centralizado.

El protocolo diseñado para la comunicación entre semáforos en una intersección se realiza de la siguiente manera, el primer paso es la lectura de la memoria EEPROM en cada uno de los semáforos con el cual se determinara la función de cada uno (maestro/esclavo) posteriormente se mantendrán en modo de espera hasta que el maestro envíe paquetes de reconocimiento a cada esclavo y se inicie una confirmación de todos los esclavos, posteriormente se realizara una lectura del estado de cada uno de los esclavos, posteriormente al recibir una respuesta



satisfactoria, el maestro enviara paquetes diseñados que contendrán la información del siguiente estado de cada uno de los semáforos, posteriormente al confirmar todos los semáforos de recibido continua con una orden de ejecución en la cual cambia el estado de todos los esclavos incluyéndose a sí mismo en la secuencia, gracias a esto se garantiza una correcta sincronización de los semáforos en una intersección.

Posteriormente obteniendo el hardware necesario para el funcionamiento del sistema de semáforos, se prosigue con el diseño y simulación del algoritmo de control, el cual será implementada en la aplicación de escritorio para tomar acciones de reducción de tiempo de traslado de vehículos de emergencia.

La solución diseñada tiene como objetivo favorecer la circulación de unidades móviles de servicios de ayuda social dentro de una ciudad hasta llegar al punto de emergencia en cuestión. Para lograr esto el sistema se sincroniza y coordina el control de semáforos a lo largo del recorrido de las unidades móviles. La solución asegura que exista un número configurable de n cruces próximos en verde durante el recorrido de una unidad móvil de servicios de ayuda social dentro de una ciudad. El número n de cruces es función del número total de cruces desde el origen del recorrido de la emergencia, hasta el destino de la emergencia. En el pseudocódigo se considera un valor de n equivalente al 20% del número de cruce totales desde el origen del vehículo hasta el punto geográfico de la emergencia.

3. RESULTADOS

Para la comprobación de la eficiencia del algoritmo de control diseñado se utilizó el simulador de trafico GREEN LIGHT DISTRICT VERSIÓN 1.3.1 [GLD]. Sobre la cual se codifico la solución diseñada. Es necesario el diseño de un escenario de validación para que funcione el simulador propuesto por lo cual el escenario diseñado para la comprobación del algoritmo consiste en una ciudad o fracción de una ciudad en donde se controlan 42 cruces, de los cuales 30 son cruces internos de la ciudad y los 12 restantes son cruces de entrada a la ciudad. Para efectos de los escenarios de validación, se considera que los vehículos de apoyo social se encuentran alejados de los puntos de emergencia, y por ello, se considera su ubicación en los cruces de entrada a la ciudad. Se considera un escenario en el cual los cruces están conectados por caminos o carreteras de cuatro carriles, dos para cada sentido de circulación.

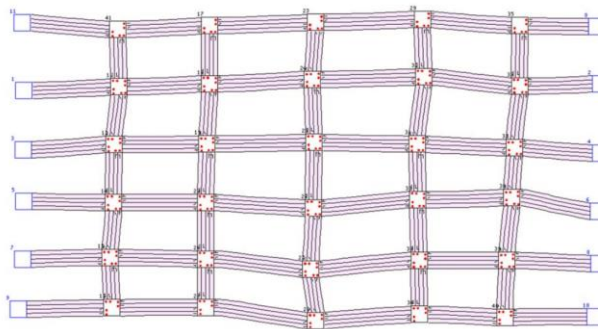
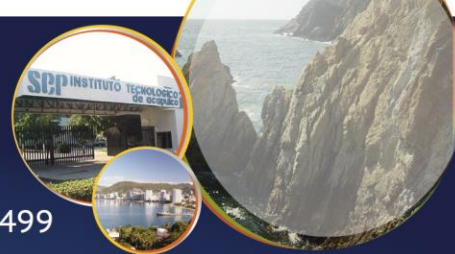


Figura 8 Escenario de validación

El escenario considera la generación de tres emergencias consecutivas (una tras otra) de ambulancia con origen en el cruce 0 y con emergencias en los cruces 3,7 y 9. Se ha definido este escenario para cuantificar el impacto que tiene el control y sincronización en emergencias de diferentes distancias. Con las características proporcionadas en este escenario el sistema calculo las rutas de atención de emergencias mostradas en las figuras ilustradas en la parte inferior.

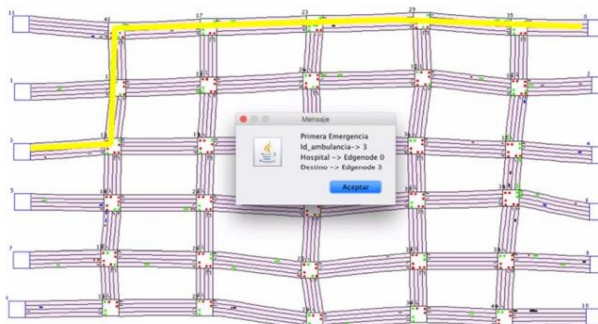


Figura 96 Ruta emergencia 1

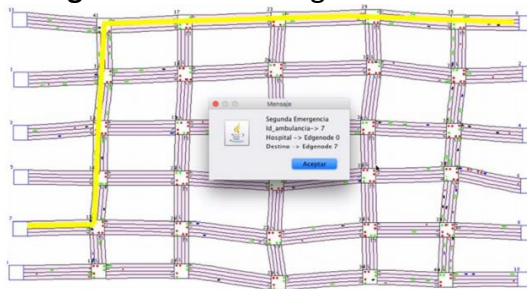


Figura 10 Ruta emergencia 2

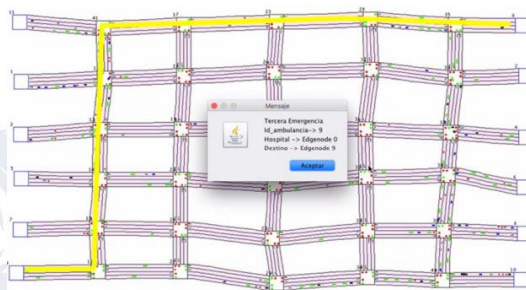


Figura 71 Ruta emergencia 3

Para el escenario anterior se han realizado dos pruebas, una prueba con tráfico moderado y otra prueba con tráfico normal dentro de la ciudad del escenario de validación. En cada prueba se midieron los tiempos de recorrido totales de las ambulancias para atender sus respectivas emergencias. En el primer caso se obtuvieron tiempos de recorrido empleando mecanismos de control de semáforos estándar, es decir, sin utilizar la solución de control y sincronización de semáforos inteligentes descrita en este documento. En seguida, se obtuvieron los tiempos de recorrido de las tres emergencias utilizando la solución de control y sincronización. Para la primera prueba (tráfico moderado) se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla1 y para la segunda prueba con tráfico normal se obtuvieron los resultados de la Tabla2.

Tabla 1 Tiempo de recorrido de emergencias con prueba de tráfico moderado

Emergencia	Tiempo recorrido de Sin de solución control y sincronización.	Tiempo recorrido de Utilizando solución de control y sincronización.	Ganancia al utilizar la solución de control y sincronización.	Porcentaje de ganancia.
1	1.083 min / 64.985 seg	1.048 min / 62.894 seg	0.03485 min / 2.091 seg	3.3 %
2	5.156 min / 309.382 seg	2.681 min / 160.831 seg	2.4758 5min / 148.551 seg	48%
3	12.218 min / 733.079 seg	3.317 min / 199.004 seg	8.90125 min / 534.075 seg	72%

Tabla 2 Tiempo de recorrido de emergencias con prueba de tráfico normal

Emergencia	Tiempo recorrido de Sin de solución control y sincronización.	Tiempo recorrido de Utilizando solución de control y sincronización.	Ganancia al utilizar la solución de control y sincronización.	Porcentaje de ganancia.



	control sincronización.	y	solución control sincronización.	y	control sincronización.	
1	1.690 min / 101.402 seg		1.266 min / 75.969 seg		0.424 min / 25.433 seg	25.1 %
2	3.432 min / 205.941 seg		1.484 min / 89.019 seg		1.949 min / 116.922 seg	56.8 %
3	6.305 min / 378.334 seg		1.636 min / 98.138 seg		4.670 min / 280.196 seg	74.1 %

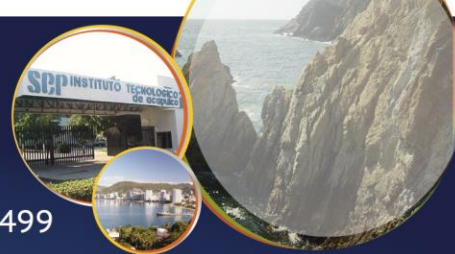
En la etapa del diseño del hardware se realizaron pruebas de funcionamiento en un espacio controlado, en el cual se comprobó la sincronización y funcionamiento de los semáforos, los cuales alimentados con energía solar presentaron un funcionamiento satisfactorio. En la figura 8, se muestra los semáforos sincronizados gracias a la implementación del protocolo de comunicación, se puede apreciar una sincronización inalámbrica satisfactoria entre el maestro y esclavo.



Figura 12: Semáforos sincronizados por comunicación inalámbrica.

4. CONCLUSIONES

Analizando los resultados podemos observar que en todos los casos existe una mejora medible utilizando la solución de sincronización y control de semáforos inteligentes. En situaciones de emergencia, con escenarios típicos y bajo condiciones de tráfico moderado, la solución alcanza a proporcionar ganancias de tiempo que oscilan entre el 3.3% de tiempo de recorrido para atender emergencias a distancias cortas y hasta un 72% de tiempo de recorrido para atender emergencias a distancias largas. Para condiciones de tráfico normales en las que posiblemente la valía del sistema sea mayor, se pueden alcanzar ganancias desde un 25.1% de tiempo de



recorrido para atender emergencias a distancias cortas, y hasta un 74.1% de tiempo de recorrido para atender emergencias a distancias largas. Lo anterior sin duda representa una mejora significativa en el aprovisionamiento de servicios de emergencia, tales como servicios médicos, bomberos y servicios de seguridad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «2015 Urban Mobility Scorecard and Appendices — Urban Mobility Information». [En línea]. Disponible en: <http://mobility.tamu.edu/ums/report/>. [Accedido: 20-sep-2016].
- [2] «Urban systems — European Environment Agency». [En línea]. Disponible en: <http://www.eea.europa.eu/soer-2015/europe/urban-systems>. [Accedido: 20-sep-2016].
- [3] «decade-of-action-report-2009.pdf». .
- [4] «¿Cuál es la relación de la contaminación, el tráfico y el Hoy No Circula?» [En línea]. Disponible en: <http://conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/6435-el-trafico-el-hoy-no-circula-y-su-relacion-real-con-la-contaminacion-en-la-cdmx>. [Accedido: 20-sep-2016].
- [5] «Índice de Tráfico 2016 vía TomTom - Instituto Mexicano para la Competitividad A.C.» [En línea]. Disponible en: http://imco.org.mx/desarrollo_urbano/indice-de-trafico-via-tom-tom/. [Accedido: 20-sep-2016].
- [6] «Reporte Nacional de Movilidad Urbana en Mexico 2014-2015 - Final.pdf». .
- [7] «Zona Metropolitana 3er lugar mundial en número de vehículos | AFmedios .- Agencia de Noticias, Colima México». [En línea]. Disponible en: <http://www.afmedios.com/2010/04/zona-metropolitana-3er-lugar-mundial-en-numero-de-vehiculos/>. [Accedido: 06-oct-2015].
- [8] Jorge Zambrano Martinez, «Sistema centralizado para la optimización del tráfico mediante un servidor de rutas», Universitat Politècnica de València, 2016.
- [9] María Eugenia Cabello Espinosa, Sara Sandoval Carrillo, y Ricardo Acosta Díaz, *Tópicos selectos de investigación en computación Aplicaciones prácticas para el desarrollo o transferencia tecnológica*. Universidad de Colima, 2016.
- [10] «SEMEX». [En línea]. Disponible en: <http://www.semex.com.mx/index.php/soluciones/central/>. [Accedido: 20-sep-2016].



- [11] «Traffic Lights - Solar Wireless Traffic Light Control System Service Provider from Vijayawada». [En línea]. Disponible en: <http://www.indiamart.com/efftronicssystems/traffic-lights.html>. [Accedido: 20-sep-2016].
- [12] «Restablecen sistema centralizado de semaforización en Hermosillo». [En línea]. Disponible en: <http://www.nuevodia.com.mx/Nota.aspx?p=6949>. [Accedido: 20-sep-2016].
- [13] K. Thatsanavipas, N. Ponganunchoke, S. Mitatha, y C. Vongchumyen, «Wireless Traffic Light Controller», *Procedia Eng.*, vol. 8, pp. 190-194, 2011.
- [14] R. Hussin, R. C. Ismail, E. Murralli, y A. Kamarudin, «Wireless Traffic Light Controller for Emergency Vehicle through XBee and Basic Stamp Microcontroller», *Procedia Eng.*, vol. 41, pp. 636-642, 2012.
- [15] D. Pescaru y D.-I. Curiac, «Ensemble based traffic light control for city zones using a reduced number of sensors», *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 46, pp. 261-273, sep. 2014.
- [16] M. Collotta, L. Lo Bello, y G. Pau, «A novel approach for dynamic traffic lights management based on Wireless Sensor Networks and multiple fuzzy logic controllers», *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, n.º 13, pp. 5403-5415, ago. 2015.
- [17] P. S. Chakraborty, A. Tiwari, y P. R. Sinha, «Adaptive and Optimized Emergency Vehicle Dispatching Algorithm for Intelligent Traffic Management System», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 57, pp. 1384-1393, 2015.