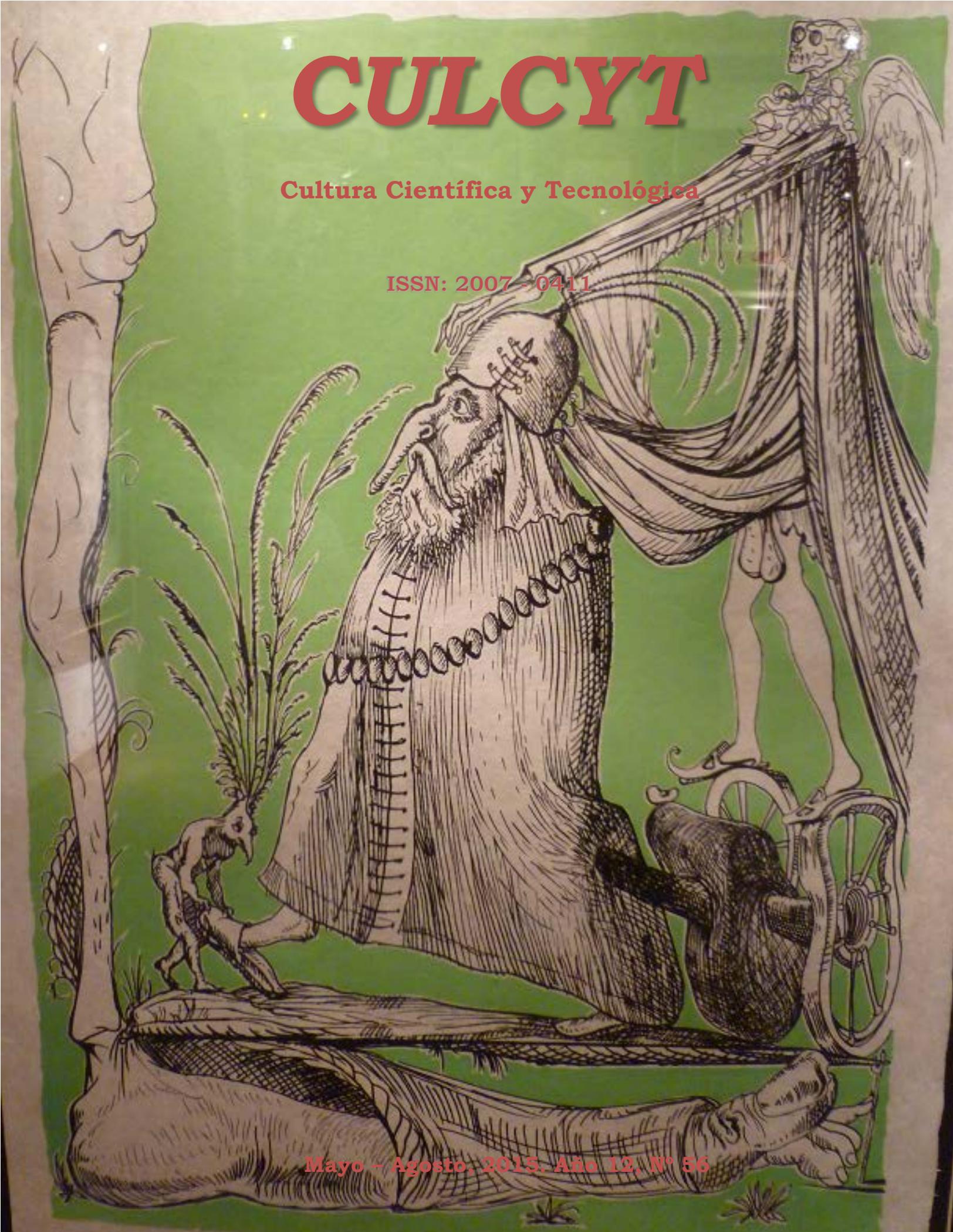


CULCYT

Cultura Científica y Tecnológica

ISSN: 2007-0411

Mayo - Agosto, 2015. Año 12, N° 56





**Universidad Autónoma
de
Ciudad Juárez**

Directorio

Lic. Ricardo Duarte Jáquez
Rector

MC David Ramírez Perea
Secretario General

Mtro. Francisco López Hernández
**Director
Instituto de Ingeniería y Tecnología**

Mtro. Ramón Chavira Chavira
**Dirección General de Difusión
Cultural y Divulgación Científica**

Dr. Jaime Romero González
**Coordinador de Investigación y
Posgrado, IIT**

Taller Editorial CULCyT

Instituto de Ingeniería y Tecnología
Av. Del Charro 619 Nte.
Edificio "E", 2º Piso, 210-C

CULCyT se fundó en diciembre de 2003
como parte del Programa para la Formación
de Investigadores del IIT. Lanzó su primer
número en abril de 2004.

CULCyT

Fundador y Director Editorial

Dr. Victoriano Garza Almanza

Comité Editorial

Dra. Lucy Mar Camacho	TEXAS A&M
Dr. Pedro Cesar Cantú	UANL
Dr. Miguel Domínguez	UACJ
Dra. Claudia García	ITSON
Dr. Victoriano Garza	UACJ
Dra. Ana Bertha Gatica	UACJ
Dra. Libertad Leal	UANL
Dr. Abraham L. López	UACJ
Dr. Jaime Romero	UACJ
Dr. Barry Thatcher	NMSU
Dr. Gilberto Velázquez	UACJ



PORTADA
*Ceremoniale D'Homage a la
Gambe Gouche*
(Homenaje al Pie Izquierdo)
Salvador Dalí
Barcelona, España
Foto VGA

CULCyT. Cultura Científica y Tecnológica.

Año 12, Núm. 56. Mayo-Agosto, 2015. Es una publicación académica multidisciplinaria publicada tetramestralmente por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a través del Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT), desde el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Av. Del Charro 619 Nte. CP 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México, Teléfono/fax (656) 688 4800 al 09.

Correo electrónico: vgarza@uacj.mx y/o culcyt2014@gmail.com

Editor responsable: Dr. Victoriano Garza Almanza.

Reserva de Derecho al Uso Exclusivo No. 04-2010-113011261700-102

ISSN: 2007-0411

Webmaster: Mtro. Leonardo Arroyo

Web: <http://www.uacj.mx/IIT/CULCyT/Paginas/default.aspx>

CULCyT Cultura Científica y Tecnológica tiene como misión contribuir a la formación integral de los jóvenes universitarios y fomentar el interés público por la ciencia y la tecnología.

Colaboraciones: enviarlas directamente al editor.

Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores.

Se autoriza la reproducción total o parcial, siempre y cuando se cite la fuente.

EDITORIAL

CARTA DEL EDITOR

- 4 **Revista CULCyT: 2004–2014**

ARTICULOS ORIGINALES

DRENAJE PLUVIAL

- 5 **Manejo del drenaje pluvial mediante el control de la fuente de escurrimientos superficiales**
MS Rosales Morales, JA Salas-Plata, MA Rodríguez Esparza

TRANSPORTE ESCOLAR

- 15 **Consideraciones para la optimización de rutas en un sistema de transporte escolar (STE)**
EA Prieto León, JO Vidaña Bencomo, MA Rodríguez Esparza

VIALIDAD

- 25 **Problemática en intersecciones viales de áreas urbanas: causas y soluciones**
G Hernández Betancourt, JO Vidaña Bencomo, MA Rodríguez Esparza

CONSTRUCCIÓN

- 33 **Análisis para la implementación del modelo *Lean* en el sector de la construcción**
JA Ramos, C Dávalos, A López, MA Rodríguez Esparza

VIALIDAD

- 41 **Evaluación del congestionamiento vehicular en intersecciones viales**
NP Rodríguez Rucobo, JO Vidaña Bencomo, MA Rodríguez Esparza

VIALIDAD

51 **Análisis y evaluación de intersecciones viales**

E Miramontes García, JO Vidaña Bencomo, MA Rodríguez Esparza

AGUA POTABLE

61 **Retos sobre la problemática del abastecimiento de agua potable a nivel mundial, nacional y en Ciudad Juárez**

PA Moreno Pulido, OF Ibáñez Hernández, MA Rodríguez Esparza

ESTRUCTURAS

69 **Tenso – estructuras de cubierta**

E Pedroza, ST de la Cruz, MA Rodríguez Esparza, E A guilera

REDES NEURONALES

79 **Optimización multiobjetivo de la estructura de una silla utilizando un híbrido de redes neuronales artificiales y NSGA-II**

A Alvarado-Iniesta, DJ Valles-Rosales, JL García Alcaraz, ND Pérez González

ILUMINACIÓN

89 **Nodo sensor inalámbrico para medir iluminación**

E Sifuentes de la Hoya, R González Landaeta, G Bravo Martínez, RG Moreno Hernández

Carta del Editor

El estudiante como investigador

En México, hasta hace dos décadas, los únicos estudiantes universitarios de nivel licenciatura que hacían investigación, que se presentaban en congresos científicos y que publicaban, eran los que estaban inscritos en carreras de ciencias. En la actualidad, con los cambios en los programas de enseñanza de las instituciones públicas de educación superior, cada vez son más las carreras universitarias –tanto de ciencias, ingenierías, como de humanidades y artes– que instruyen a sus estudiantes con esquemas de corte científico.

En este número, *CULCyT* se complace en publicar 8 artículos de investigación realizados por estudiantes de Ingeniería Civil, del Instituto de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, realizados bajo la coordinación del Mtro. Manuel A. Rodríguez Esparza y la tutoría personalizada de varios profesores, en el marco de un curso regular de investigación llevado a cabo el primer semestre del 2015.

Victoriano Garza Almanza

Manejo del drenaje pluvial mediante control de la fuente de escurrimientos superficiales

Martha Susana Rosales Morales¹, Dr. Jorge A. Salas Plata M.² Mtro. Alberto Rodríguez Esparza³

¹Estudiante del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

^{2,3}Docente del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Resumen

Las zonas urbanas que carecen de planificación y urbanización eficiente que incluya el diseño y construcción de sistemas de drenaje pluvial, enfrentan inundaciones que pueden ser mínimas o graves y pueden significar costos a la población y a las instituciones públicas y privadas, por el daño a la infraestructura. Conforme la sociedad y la tecnología avanzan, los ingenieros se enfrentan a retos de salubridad y de suministro de una infraestructura hidráulica urbana sostenible. El uso de nuevas tecnologías ayuda considerablemente a resolver los problemas más urgentes de drenaje pluvial. Este artículo aborda el tema de las inundaciones y sus efectos y sugiere el acopio de los escurrimientos en su fuente, es decir, mediante diques. Se llevarán a cabo estudios de campo y SIG para ubicar los mejores sitios de acopio que a su vez ayuden a la recarga del acuífero.

Palabras clave: Obras hidráulicas, inundaciones, planeación urbana, drenaje urbano, riesgo de inundación.

Introducción

Históricamente, los sistemas de drenaje urbano han sido vistos desde varias perspectivas. En diferentes periodos y lugares distintos, estos desagües han sido considerados como un recurso importante, un mecanismo conveniente de limpieza citadina, un medio eficiente de transporte de desechos, una solución al problema de las inundaciones y una reducción de las molestias por las aguas residuales sin control que son transmisoras de enfermedades. En general, el clima, topografía, geología, conocimiento

científico, ingeniería, capacidades de construcción, valores sociales, creencias religiosas y otros factores, han influenciado la configuración local del drenaje urbano (Burian, Edwards, & G, 2002).

El drenaje urbano debe diseñarse para poder transportar dos tipos de líquidos: aguas residuales y pluviales. Las aguas residuales son líquidos provenientes del uso doméstico y comercial o de procesos industriales, entre otros, y deben ser recolectados y dispuestos de manera apropiada para evitar condiciones que

propicien la contaminación. Después de una inundación, el volumen de residuos que se generan a menudo es importante y de una especie diferente (residuos húmedos mezclados, incluso contaminados) (Beraud, Barroca, Serre, & Hubert, 2011).

Los sistemas de drenaje deben cumplir las siguientes tareas fundamentales de interés público:

- Asegurar una recolección segura e higiénica y transporte de todo el alcantarillado sanitario incluyendo aguas residuales domésticas e industriales.
- La protección de áreas densamente urbanizadas contra inundaciones.
- La protección de los receptores contra daño ambiental.

Las aguas pluviales son las escorrentías producto de la precipitación. Se toman en cuenta tanto las aguas residuales

como las pluviales durante la planificación del sistema de drenaje urbano. A través de la historia, varias civilizaciones (entre ellas la hindú y la minoica) evidencian que los sistemas urbanos de drenaje fueron construidos con gran cuidado y que el objetivo de estos era el de coleccionar las aguas residuales y pluviales, las cuales se mezclaban en un solo conducto o bien se mantenían separadas durante la recolección y eliminación.

De forma ideal, los sistemas de drenaje se diseñan, construyen y modernizan con base a la planeación y ordenamiento territorial de la ciudad; en la práctica, las actividades anteriormente mencionadas se llevan a cabo en respuesta a los cambios de la escorrentía urbana con modificaciones en base a prueba y error.

Diseño de sistemas de drenaje pluvial

Los sistemas de drenaje urbanos están principalmente diseñados para que los conductos subterráneos no se vean afectados por los flujos de superficie durante una tormenta con determinado periodo de retorno. La modelación de un sistema de drenaje pluvial se basa en la descomposición del proceso en subprocesos como: intercepción (principalmente de depresiones superficiales), infiltración, flujo sobre la superficie, flujo a lo largo de la calle (flujo de cuneta), flujo en estructuras de entrada y flujo en redes de alcantarillado.

Una de las mayores deficiencias en el diseño del drenaje urbano en la actualidad es la complejidad para modelar el proceso de inundación. Por ejemplo, cuando un sistema subterráneo está lleno, y fue delineado para conducir aguas residuales, el agua que sale del sistema interfiere con el agua que fluye superficialmente porque no hay más capacidad de transporte del sistema de alcantarillado.

El concepto de drenaje doble permite que las inundaciones en un ambiente urbano sean modeladas más realísticamente tomando en cuenta todas las características del terreno y las estructuras

hechas por el hombre que afectan la escorrentía superficial.

La gestión de aguas pluviales ha estado enfocada en resolver problemas de inundación transfiriendo grandes volúmenes de agua lo más rápido posible. Esto aumenta inevitablemente el volumen y descargas máximas causando daños no sólo a los tramos aguas abajo, sino también a los cuerpos receptores naturales, así como al ambiente en su conjunto. El control de la fuente es una estrategia alternativa que trata de emular las condiciones naturales de captación y así adelantarse o revertir las consecuencias negativas. La filosofía general es reducir y atenuar los flujos de la tormenta antes que lleguen a la red de drenaje y mejorar la calidad del agua permitiendo que tome lugar un tratamiento natural (Maksimovic & Prodanovic, 2001).

En adición a la reducción de los riesgos de inundación, deben ser diseñados y operados sistemas modernos de drenaje pluvial de manera que también contribuyan a la reducción de la contaminación y al mejoramiento del equipamiento urbano. Al parecer, el nivel al que estos aspectos pueden ser abordados y aplicados con éxito depende del desarrollo económico del país.

La prevención de inundaciones en zonas urbanas causadas por los sistemas de alcantarillado inadecuados se ha convertido en una cuestión importante. Los sistemas de drenaje urbano deben funcionar con eficacia de acuerdo con las condiciones climáticas y los sistemas de drenaje diseñadas para hacer frente a las condiciones de tormenta más extremas, aunque estos suelen ser demasiado caros de construir y operar (Schmitt, Schilling, Sægrov, & Nieschulz, 2002). Algunos ejemplos de obras hidráulicas se pueden ver en la Tabla 1.

Modelo de sociedad	Obras hidráulicas
Sociedades tradicionales	<ul style="list-style-type: none"> — Acequias, canales y otras infraestructuras de regadío — Pequeñas presas — Motas y diques laterales — Desviación ocasional de algún tramo del curso fluvial — Eliminación puntual de algún meandro del curso fluvial
Sociedades modernas «tecnificadas»	<ul style="list-style-type: none"> — Canalizaciones — Embalses — Diques — Desvíos — Cubrimiento — Sistema de evacuación de aguas pluviales
Sociedades modernas «ambientalizadas»	<ul style="list-style-type: none"> — Eliminación de las obras hidráulicas «duras» — Planificación de los usos del suelo en los espacios inundables

Tabla 1: Evolución de las obras hidráulicas de defensa frente a las inundaciones. Fuente: (Roset Pagès, Saurí Pujol, & Ribas Palom, 2010)

El riesgo de inundaciones en las zonas urbanas provocado por la urbanización y el cambio climático significan un problema para el ciudadano, la comunidad, y requiere de un sistema de información flexible que se puede configurar en un sistema de gestión eficaz.

Deben tomarse numerosas decisiones complejas para expandir los sistemas de drenaje y controlar los niveles de contaminación; dichas decisiones deberán ser pensadas y ejecutadas con un enfoque económico, social y ambientalmente sustentable (Milina, Nieschulz, Selseth, & Schilling, 2001).

Diques de almacenamiento

Los efectos que puede tener el agua pluvial pueden ser devastadores o por el contrario, pudiesen llegar a ser enriquecedores y ello dependerá en gran medida del control que se tenga sobre ella en la etapa de captación durante la precipitación. El diseño y construcción de represas o diques para lograr manipular la precipitación fluvial que logre darle un impacto benéfico o simplemente menos catastrófico a las zonas urbanas debe ser percibido como un “proceso de urbanización de la naturaleza para reproducir el metabolismo de las ciudades en el desarrollo de la modernización” (Romero Toledo, 2014)

Los diques permitirán un manejo más eficiente de la captación fluvial obtenida, mejorando su transporte. Las represas

pueden ser consideradas entonces como un símbolo de progreso tecnológico en la naturaleza y su construcción representa una transformación crucial para las zonas urbanas. Estas generan también cambios en las estructuras económicas y políticas debido a la modificación del paisaje, la escala de la represa y los cambios planeados en el régimen del flujo de las cuencas fluviales.

Los impactos que puede tener la construcción de represas para así contrarrestar los efectos desastrosos que llegaría a tener una tormenta extrema en la zona urbana es hasta el momento solo un proyecto de investigación que merece ser considerado y sus efectos aún no pueden ser evaluados.

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Se debe considerar un enfoque integral para lograr la reducción de pérdidas por las

inundaciones, así como los requisitos para el diseño de un sistema de gestión de

modelos proactivos. Se puede incluir también un modelado de simulación hidráulica completa de un sistema de drenaje urbano, el sistema de alcantarillado y la superficie bajo un flujo sobrecargado utilizando nuevos métodos numéricos junto con técnicas de SIG.

El desarrollo de SIG marcó el comienzo de una revolución en el espacio de representación de datos, recolección, almacenamiento, gestión, análisis y modelado.

Los efectos del vínculo de los SIG con el análisis espacial han hecho su mayor progreso en el área de modelación ambiental tales como el modelado hidrológico en las grandes cuencas fluviales (Milina, Nieschulz, Selseth, & Schilling, 2001).

La evolución que han tenido las obras hidráulicas puede demostrar la importancia que estas obras tienen como dispositivos contra las inundaciones. A medida que la tecnología avanza en materia ingenieril podemos ver que también avanzan los diseños hidráulicos y el uso de nuevos materiales (Roset Pagès, Saurí Pujol, & Ribas Palom, 2010).

La complejidad inherente al riesgo de inundación requiere involucrar otras instancias para su análisis, además de lo científico-técnico, que se vincula directamente con el estudio de las causas inmediatas del desastre. Para ello, el riesgo puede descomponerse en cuatro dimensiones solo diferenciables en términos analíticos: peligrosidad, vulnerabilidad, exposición e incertidumbre.

La *peligrosidad*, o amenaza, se refiere al potencial peligroso propio de los fenómenos naturales y de los procesos tecnológicos. Cada peligrosidad tiene detalles propios, por lo que su estudio requiere conocimiento experto proveniente de los campos de las ciencias físicas, básicas y naturales, para analizarla y tratar de predecir su comportamiento.

La *incertidumbre* tiene que ver con las dimensiones no cuantificables del riesgo, con lo desconocido. Estamos frente a situaciones que no pueden resolverse a partir del conocimiento existente pero que requieren de una solución inmediata por la importancia de los valores en juego (vidas humanas, bienes materiales). Por eso, la incertidumbre tiene, al menos, dos dimensiones:

a) una *técnica*, que se refiere a la falta de respuestas concluidas desde el saber científico y técnico respecto a las características de las amenazas y de la sociedad impactada, y

b) una *política*, que se refiere a la necesidad de tomar decisiones aun cuando no se tengan certezas desde el conocimiento experto.

El reconocimiento de estas carencias hace que se vuelva central la incorporación a la toma de decisiones de todos los actores sociales que se encuentran expuestos al riesgo, quienes no solo sufren las consecuencias de los desastres sino que también son, por lo general, los que mayores aportes pueden hacer para reducir los márgenes de incertidumbre.

La peligrosidad y la exposición han recibido mayor atención desde el saber

científico: la primera en el ámbito de las ciencias físicas, naturales e ingenieriles, mientras que la segunda tiene su abordaje más común desde las ciencias de la planificación territorial (estudios de usos del suelo, de distribución y localización de la población en el territorio, etc.). La vulnerabilidad y la incertidumbre, ancladas en los procesos sociales, económicos y políticos, son las dimensiones de menor desarrollo relativo y, sin embargo, son las que se pudieran considerar con un mayor aporte pueden hacer a la gestión del riesgo (Roset Pagès, Saurí Pujol, & Ribas Palom, 2010).

La sedimentación es el resultado, en gran medida, de los fenómenos de erosión que se debe, en algunos casos, a la falta de medidas para la conservación de la cobertura vegetal de las cuencas hidrográficas. En estas condiciones, los

lechos de los ríos de las cuencas sufren un proceso continuo y progresivo de azolvamiento, lo cual por una parte disminuye la sección del cauce y reduce la capacidad del río para conducir grandes caudales, y por otra parte, provoca cambios en el curso de los afluentes y ramales principales del sistema fluvial. Otros factores son los siguientes:

- La pobre protección de las laderas en algunas zonas de riesgo sometidas a las inundaciones.
- El insuficiente drenaje de los suelos de la zona alta de las cuencas originado por la propia estructura de los mismos que infiltran poco y escurren casi toda la precipitación.
- La considerable obstrucción de los cauces en algunas zonas (Sagrera Díaz, Soler Guitart, & Sánchez Juny, 2012).

Efectos de la urbanización

El desarrollo de las áreas urbanas afecta significativamente el ciclo hidrológico natural con lo que esta afectación es consecuencia de la concentración de la población en una región. El principal factor de cambio es el proceso de urbanización que evoluciona en varias etapas en el desarrollo de una ciudad. Algunos de estos cambios han propiciado a lo largo de la historia el desarrollo de infraestructuras en beneficio de esta población, para mejorar la calidad de vida de sus habitantes, entre ellas, infraestructura para desalojar tanto las aguas residuales como las aguas pluviales.

Las inundaciones en el medio urbano son fenómenos que generalmente se caracterizan por su corta duración y por los efectos devastadores debido a la alta concentración de personas, viviendas y bienes localizados en estas áreas. En casos de inundaciones producidas por eventos de lluvias excesivas, los caudales de escorrentía pueden circular por las calles de las ciudades de forma incontrolada si el sistema de drenaje superficial o subterráneo es insuficiente, generando condiciones de inseguridad para la circulación vehicular y

peatonal (Gomez, Macchionez, & Russo, 2010)

Actualmente, se tiene alguna experiencia sobre la recarga en áreas urbanas y la existencia de diferentes fuentes de recarga como son: infiltración en grietas, sumideros de agua pluvial, filtración de pozos negros, estanques, letrinas, red de alcantarillado y fugas del sistema de suministro, complican el escenario para determinar un volumen aproximado a la realidad (Dávila Pórcel & De León Gómez, 2011) (Aragón Hernández, 2013).

En el plan de ordenamiento y manejo de una microcuenca se definen las acciones concretas para la protección y la gestión de los recursos naturales, partiendo de la realidad de la microcuenca y construyendo acciones de futuro acordes con las intenciones concertadas de los actores en cinco fases: diagnóstico; prospectiva; formulación; ejecución; seguimiento y evaluación (Barros & Vallejo, 2007).

Por otra parte, el desarrollo de las áreas urbanas conlleva, por un lado, un incremento de áreas impermeables y, por el otro, una disminución de áreas verdes. La modificación de las características del terreno natural original, tiene como resultado cambios extremos en la respuesta hidrológica de la cuenca ante un evento de lluvia. La impermeabilización del terreno natural desde el punto de vista hidrológico,

implica disminuir la retención superficie temporal del agua, la infiltración y la fricción del terreno. Esta dinámica da como resultado un aumento de volúmenes de escurrimiento y de las velocidades de los flujos de agua y disminución del tiempo de concentración.

El cambio en la respuesta hidrológica es incrementado como consecuencia de un criterio tradicional aún presente en muchos procesos de urbanización: las aguas pluviales deben ser evacuadas de la superficie de los tejados y las calles lo más eficaz y rápidamente posible. Cuando este crecimiento continúa, sobre todo en las cuencas de cabecera, las calles y la red de alcantarillado presentan hidrogramas con mayor volumen y gastos pico más elevados, provocando problemas de inundación en las zonas más bajas, debido a que la capacidad de los elementos del drenaje urbano es insuficiente (Aragón Hernández, 2013).

La concentración de la población en las ciudades provoca un progresivo aumento de la complejidad del diseño de la infraestructura en particular las relacionadas con la gestión del agua en la ciudad, entre ellas, el drenaje urbano. En ocasiones, los sistemas de drenaje urbano presentan importantes problemas y carencias que se ponen de manifiesto en forma de inundaciones.

Metodología

Para la búsqueda de literatura que fue de ayuda para el presente artículo, se definió primero el tema y con base a él se tomaron en cuenta algunas palabras clave que podrían ser de utilidad a la hora de empezar la investigación.

Se inició con el acceso a la base de datos de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) por ser la institución más cercana para el acopio de información. Durante la búsqueda de artículos electrónicos se pudo detectar que la cantidad de estos era inmensa, y se tuvo que filtrar el listado de documentos de acuerdo a los títulos que parecían más indicados en cuanto al tema propio. Se descargaron los artículos electrónicos y se guardaron para su posterior revisión. Debido a la cantidad menor de artículos en inglés se optó por acudir a la base de datos con la que cuenta la Universidad de Texas en El Paso (UTEP). Al contar con acceso a esta base de datos se tuvieron que seleccionar cuidadosamente también algunas palabras clave para poder iniciar la búsqueda. La gran mayoría de los

artículos electrónicos que aparecieron provenían de la página web American Society of Civil Engineers (ASCE), con lo que se pudo determinar que esta es una fuente de gran utilidad debido a la índole del tema escogido. Una vez que se contaron con una gran cantidad de artículos electrónicos se inició la revisión completa de cada uno de ellos y la realización de un resumen sobre las ideas más importantes que fueran de utilidad y relevancia para el artículo. Una vez terminada la revisión de la literatura se procedió a vaciar la información en un documento que tuviera coherencia incluyendo no solo las ideas de los autores sino también las interpretaciones propias de dichos artículos. Se analizó que el documento redactado tuviera una secuencia lógica y una idea clara de lo que se pretendía comunicar.

Para la ubicación de los puntos de embalse se realizarán visitas de campo y se obtendrán datos del Centro de Información Geográfica del IIT-UACJ.

Conclusiones

Los efectos devastadores de una inundación en un ámbito urbano pueden llegar a prevenirse si tales zonas contaran con un buen sistema de drenaje que permita al agua fluvial desembocar en los lugares diseñados y planeados para tal fin. Y aunque la ejecución de tales obras puede llegar a ser costosa, suele ser más costoso aun el escenario donde una inundación cobra vidas

humanas y daños materiales cuantiosos. Los Sistemas de Información Geográfica son una herramienta que nos permite modelar y analizar situaciones de inundaciones y así poder encontrar un diseño que desempeñe mejor todos los aspectos que requeridos para que funcione efectivamente. Las decisiones que se tomen sobre las obras hidráulicas que protejan los intereses antes

mencionados deben tomarse con un enfoque económico, social y ambientalmente sustentable.

El embalse del agua mediante diques, puede significar una solución viable

al problema de las inundaciones en la ciudad, a la vez que una forma de propiciar la recarga de los acuíferos.

Referencias

Andoh, Robert Y.G.; (2002): Urban drainage and wastewater treatment for the 21st century: pp 1-16. American Society of Civil Engineers.

Aragón Hernández, José Luis (2013): Modelación numérica integrada de los procesos hidráulicos en el drenaje urbano: pp 292. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Tesis Doctorals en Xarxa.

Barros, Juan Fernando; Vallejo, Luz Eliana; (2007): Metodología para la evaluación de la condición de corrientes urbanas. Rev.EIA.Esc.Ing.Antioq No.7 Envigado Jan./June 2007 ISSN 1794-1237.

Beraud, Hélène; Barroca, Bruno; Serre, Damien; Hubert, Gilles; (2011): Making urban territories more resilient to flooding by improving the resilience of their waste management network. A methodology for analyzing dysfunctions in waste management networks during and after flooding: pp. 425-432. Université Paris Est – Marne la Vallée, Leesu Umr Ma 102 EIVP (École des Ingénieurs de la Ville de Paris). American Society of Civil Engineers.

Burian, Steven J.; Edwards, Findlay G.; (2002): Historical perspectives of urban drainage: pp 1-16. American Society of Civil Engineers.

Dávila Pórcel, Rene Alberto; De León Gómez, Héctor (2011): Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. Boletín de la Sociedad

Geologica Mexicana. Vol. 63 No. 3, Diciembre 2011.

Fujita, Shoichi; (2002): A scenario for the modernization for urban drainage: pp 1-11. American Society of Civil Engineers.

Gomez, Manuel; Macchionez, Francesco; Russo, Beniamino (2010): Modelo físico para el estudio de los criterios de riesgo en zonas urbanas: pp 1-13. Congreso Latinoamericano de Hidráulica. "XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica". Punta del Este.

González, Silvia G (2005): Ciudad visible versus ciudad invisible; La gestión del riesgo por inundaciones en la ciudad de Buenos Aires: pp. 53-67. Territorios 13 / Bogotá.

Hettiarachchi, Suresh L.; Luft, Anthony J, Onorati, Jane; (2004): An innovative and multi-faceted approach to reducing urban flooding. City of Minneapolis Public Works Department: pp 1-6. American Society of Civil Engineers.

König, Axel; Sægrov, Sveinung; Schilling, Wolfgang; (2002): Damage assessment for urban flooding: pp 1-11. American Society of Civil Engineers.

Maksimovic, Cedo; Prodanovic, Dusan; (2001): Modelling of urban flooding – Breakthrough or recycling of outdated concepts: pp 1-9. Urban water research group, EWRE section, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial

college of STM, London SW7 2BU, UK. American Society of Civil Engineers.

Milina, Jadranka; Nieschulz, Klaus-Peter; Selseth, Ingrid; Schilling, Wolfgang (2001): A proactive approach to flood risk management in urban drainage systems: pp. 358-366. American Society of Civil Engineers.

Reeves, Mike; Lewy, Mark; (2001): Modelling of groundwater infiltration in urban drainage networks: pp 1-11. American Society of Civil Engineers.

Romero Toledo, Hugo (2014); Ecología política y represas: elementos para el análisis del Proyecto HidroAysén en la Patagonia chilena. Revista de geografía Norte Grande No.57, Mayo 2014. ISSN 0718-3402.

Roset Pagès, Dolors; Saurí Pujol, David (2010); Ribas Palom, Anna: Las obras hidráulicas en

los sistemas fluviales de la Costa Brava: Preferencias locales y limitaciones de un modelo convencional de adaptación al riesgo de inundación: pp 79-93. Investigaciones geográficas, No. 22.

Sagrera Díaz, Albert; Soler Guitart, Joan; Sánchez Juny, Martí (2012): Análisis de inundaciones. Estudio de casos (Tesis). Universitat Politècnica de Catalunya.

Schmitt, Theo G.; Schilling, Wolfgang; Sægrov, Sveinung; Nieschulz, Klaus-Peter; (2002) Flood risk management for urban drainage systems by simulation and optimization: pp 1-14. Global Solutions for Urban Drainage. American Society of Civil Engineers.

Zio, Enrico; (2014): Vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. Vulnerability, Uncertainty and Risk: pp 23-30. American Society of Civil Engineers.

Consideraciones para la Optimización de Rutas en un Sistema de Transporte Escolar (STE)

Efren Armando Prieto Alvarez¹, Dr. José Osiris Vidaña Bencomo², Mtro. Alberto Rodríguez Esparza³.

¹Estudiante del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

^{2,3}Docente del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Resumen

El presente artículo hace referencia hacia la introducción al transporte escolar, su clasificación, atributos, y su composición, así como una breve descripción del uso de tecnologías y software para la optimización del servicio. Se realizó un estudio de artículos publicados con relación al tema, en diferentes bases de datos. La planeación eficiente de rutas para un sistema de transporte escolar, ocupa un lugar muy importante en cuestión de cómo trasladar a los estudiantes desde y hacia las escuelas de la manera más segura, económica, y conveniente para una sociedad que está en constante desarrollo.

Palabras Clave: Planificación de rutas de Transporte Escolar, School Transportation, School Bus Routing Problem

Introducción

El transporte ha sido y será un elemento clave para el desarrollo de las civilizaciones; el transporte consta de trasladar personas o bienes materiales de un lugar a otro, además de jugar un papel muy importante en la vida moderna, ya que la eficiencia de un sistema de transporte aumenta el índice competitivo y económico de un país. Un sistema de transporte urbano está principalmente conformado por cuatro elementos: vehículos, vías, terminales y sistemas de control.

El transporte proviene de la necesidad que surge de actividades diarias del ser humano, tales como producción,

consumo, residencia y recreación, que se generan dependiendo de su área geográfica, ya sea un país, ciudad, y/o colonia, estas son definidas como un sistema de actividades, y son los factores que generan los viajes y la demanda de transporte. Esta demanda es cubierta a través de un conjunto de medios, modos y terminales y la manera en cómo funcionan estos elementos se les conoce como sistemas de transporte (Liu, 2002).

La interacción de los sistemas de actividades y transporte producen un patrón de flujos, los cuales están constituidos por diversos viajes, que definen los orígenes y destinos, así como las diferentes rutas, por

las cuales se emplearan diferentes medios y modos de transporte para trasladarse. Para un eficiente funcionamiento del sistema de transporte debe de existir un equilibrio entre la oferta y demanda del transporte (Spada, et al, 2003).

La demanda se refiere a la necesidad de trasladar, ya sea bienes o personas según sea el caso. Para definirla se requiere calcular el volumen, así como la distribución espacial y temporal de los viajes que se realizan en la ruta de estudio. La oferta está conformada por la flota de

unidades de transporte que prestan el servicio, las rutas, la infraestructura vial y la calidad del servicio, los cuales deben ser acorde a la demanda del servicio para que la actividad resulte eficiente (Stojanovski, 2013).

La meta del sistema de transporte es tener un sistema de transporte rápido y cómodo, pero a la vez flexible y accesible a todos los usuarios, siendo necesario una buena accesibilidad, es decir, que tenga facilidad para que los pasajeros puedan llegar a los paraderos (Stojanovski, 2013).

Importancia de la planeación de un Sistema de Transporte Escolar (STE)

Los medios de transporte que los usuarios utilizan para trasladarse a los centros de estudios son variados, tales como: bicicleta, vehículo particular, autobús, colectivos o caminado, ya sean sus necesidades o posibilidades, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Medios de transporte en los que los alumnos se trasladan a la escuela (Instituto Municipal de Planeación, 2010)

La optimización de rutas de un Sistema de Transporte Escolar (STE) es considerada un tema de vital importancia para las administraciones públicas, lo

anterior debido a la obligatoriedad del servicio y la trascendencia socioeconómica. Una de las grandes preguntas de investigación es cómo

transportar a los estudiantes de manera más segura, confiable y eficiente, económica y conveniente (Kumar, et al ,2014).

El transporte escolar es un servicio, al cual se le debe dar prioridad, para así garantizar el acceso diario a la educación en sus diferentes niveles. El nivel del éxito y eficacia de un STE, depende de ciertos factores, como el tipo de transporte escolar elegido, la traza vial alrededor de las escuelas, la logística de las rutas con y sin estudiantes (Molina, 2012).

En la selección de rutas para vehículos de transporte escolar, es necesario que se establezcan una o varias rutas dentro una red vial, para poder así colocar estaciones por las cuales pasen los autobuses y recojan a los estudiantes, los cuales deben asignarse a las estaciones más cercanas, para posteriormente trasladarlos a la escuela. De esta forma los diseñadores o planificadores de rutas puedan identificar el área con más demanda de usuarios para así poder establecer en que punto de la ruta se

deben de poner las estaciones (Nayati, 2008).

La planeación de rutas o trazo de las mismas, se ha vuelto un tema de gran importancia, al grado que se ha logrado crear su propia línea de investigación, la cual consiste en la selección de un conjunto de recorridos para la flota de vehículos, que parten de un origen y así recoger a los usuarios que están dispersos geográficamente con el fin de trasladarlos a sus destino (Díaz, 2006).

Según Nayati, en la selección de rutas para las unidades de transporte escolar se considera que los principales objetivos en los que se enfoca la optimización de esta son: reducir al mínimo el costo de transporte, reducir al mínimo el tiempo de transporte, minimizar el número total de autobuses para el transporte, diseño de estaciones para recoger a los estudiantes y la reducción o erradicación de los riesgos de circulación como cruces peligrosos, pasos a nivel (Nayati, 2008).

Elementos a considerar para un análisis de un STE

Para el correcto análisis de un sistema de transporte escolar, es necesario conocer los elementos básicos que lo conforman, los cuales puede proporcionar a la empresa que presta el servicio observaciones directas de campo como:

- *Longitud de la ruta:* Es la suma de la distancia total que recorre la unidad desde donde comienza su recorrido hasta donde lo acaba, es decir el trayecto entre el origen y destino, expresada en km.

- *Tipo y clase de servicio:* Es la manera en que operacionalmente se comporta una unidad transportadora en un sistema de transporte establecido.
- *Itinerario:* Recorrido detallado que hace una unidad transportadora (Autobús) a lo largo de una ruta preestablecida.
- *Número de autobuses asignados:* Unidades que están disponibles para satisfacer la demanda, de cierta ruta.

- *Capacidad del tipo de autobús:* Número máximo de pasajeros que se pueden trasladar en una unidad transportadora según su tipo, en condiciones seguras.
- *Tiempo de recorridos programados:* Tiempo total expresado en horas, minutos, segundos en los que la unidad transportadora realiza su recorrido.
- *Número y ubicación de las paradas:* Número total de las estaciones (paradas) y ubicación de las mismas a lo largo de la ruta.
- *Tiempo de servicios programados:* Unidad de medida de este parámetro es en segundos, minutos, en los que la unidad transportadora está detenida en las estaciones, para que los usuarios suban o bajen de ella.
- *Frecuencias de servicios o intervalos:* Intensidad con la que las unidades transportadoras pasan por cierto punto de la ruta preestablecida. Esta varía dependiendo de la velocidad y las condiciones de tráfico.
- *Volúmenes de usuarios:* Cantidad de usuarios que son transportados a través de la ruta preestablecida. (Instituto Mexicano del Transporte, 1992).

Factores que influyen en la capacidad de un Autobús

Uno de los aspectos que son muy importantes de analizar, dentro de un sistema de transporte escolar, es la capacidad del transporte cuya definición se refiere al máximo número de pasajeros que se pueden transportar en una ruta establecida durante un tiempo determinado, bajo condiciones de operaciones, seguridad, funcionalidad y velocidades razonables.

Es necesario que el transporte escolar sea flexible para que pueda adaptarse a las diferentes configuraciones viales que existen en la ciudad, también es preciso que se adapte a las necesidades de demanda, tanto en el número de unidades que sean suficientes para compensar la demanda y que cumplan con cierta calidad de nivel de servicio.

Los factores que influyen en la capacidad de transporte de un autobús están

en función de cuatro factores, en los cuales se puede definir la capacidad máxima de pasajeros que se puede transportar por ruta ligados básicamente a ciertos elementos, ver Tabla 1.

La ocupación en los autobuses se refiere al número máximo de pasajeros que físicamente pueden acomodarse en dicha unidad, es un factor que se requiere conocer pues influye directamente con la capacidad del sistema de transporte y este es medido en pasajeros/autobús.

El tamaño y tipo de autobús ha evolucionado con respecto al tiempo. Las primeras unidades contaban con una capacidad de seis personas por unidad mientras que en la actualidad existen autobuses de 53 asientos y con una capacidad máxima entre 50 a 80 pasajeros. En México el Autobús que más se utiliza cuenta con un número de 40 asientos y una

capacidad máxima de 80 pasajeros por unidad. En la siguiente Tabla 2, se muestran la clasificación y capacidad de los autobuses.

Tamaño y tipo del vehículo	Ocupación del vehículo	Frecuencia de paso	Tiempo de servicio
Características antropométricas	Demanda potencial en la ruta.	Longitud de la ruta	Concentración de distribución de viajeros
Características ambientales	Localización de la ruta	Control de intervalos	Características de las paradas.
Geometría vial	Operación de la ruta	Volumen y composición del tráfico	Número y longitud de las posiciones de carga.
Legislación existente		Velocidad de operación	Características de las estaciones
Tecnología		Tamaño de la flota	Espaciamiento entre paradas
		Tiempos de aceleración y desaceleración	Accesibilidad de los pasajeros a las paradas

Tabla 1. Factores que influyen en la Capacidad de un Autobús. (Instituto Mexicano del Transporte, 1992)

Tipo de autobús	No. De asientos	Capacidad total
Mini/bus	12	20
Pequeño	20	30
Estándar	40	80
Grande de un piso	50	100
Grande de dos pisos	80	120
Extra grande de dos pisos	80	170
Articulado	55	120
Extra grande articulado	55	190

Tabla 2. Capacidad según el tipo el Autobús. (Instituto Mexicano del Transporte, 1992)

Sistemas de Transporte Inteligentes

Los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS por sus siglas en inglés) son un conjunto de aplicaciones informáticas y sistemas tecnológicos desarrollados con el objetivo de optimizar el transporte y mejorar la seguridad, capacidad, fluidez y comodidad. Algunos ejemplos básicos de los instrumentos tecnológicos que se emplean para conformar un ITS son: cámaras de video para detectar accidentes, tableros de mensajes de información vial, detectores de vehículos para calcular tiempos de recorrido, centros de gestión de tránsito y sistemas inteligentes de semáforos referencia (Acha, et al, 2004).

Estos sistemas se apoyan en la tecnología, informática, telecomunicaciones y empleados de administración de redes y transporte. De este modo, la tecnología empleada en ITS permite en varias de sus aplicaciones contar con información que se utiliza sea en tiempo real para poder así

analizarla y poder tener una mejor interpretación de la misma y tomar mejores decisiones al momento de la planificación (Laideira, et al, 2011).

Este tipo de sistemas inteligentes es actualmente usado para el control de los sistemas públicos de Estados Unidos de América y Europa. La utilización de los ITS permite mejorar el control de tráfico en un sistema de transporte público y la implementación de la sincronización de semáforos, lo que ha producido excelentes resultados en las ciudades medianas de países europeos como Inglaterra, Francia, Holanda, Alemania, a su vez en el continente americano, principalmente Estados Unidos y Canadá, arrojando una reducción del 5% al 23% en los tiempos de viaje y parada, además de la reducción del 20% al 50% de los retrasos causados por semáforos (Laideira, et al, 2011).

Uso de tecnologías para optimización de rutas

Debido a los avances tecnológicos que han ocurrido en los últimos años, existen varios tipos de tecnologías que nos pueden ayudar a mejorar un sistema de transporte, una de ellos es el sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés) y dispositivos móviles entre otros, que sirven para capturar información acerca de la trayectoria de un objeto.

El concepto de trayectoria está relacionado con la posición cambiante de un objeto en el espacio en un cierto intervalo

de tiempo (Laideira, et al, 2011). En este caso, el análisis de un sistema de transporte escolar, las unidades transportadoras deben recorrer una ruta preestablecida y deben de contar con cierto número de estaciones establecidas (paradas) a lo largo de la misma, donde la unidad de transporte debe detenerse para recoger a los usuarios. Dichas estaciones son componentes importantes para un (STE) ya que limitan la capacidad de la línea, regulan la cantidad de

unidades transportadoras que pueden operar en la ruta (Moreno, et al, 2010).

El uso de las redes basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de georreferenciación puede facilitar en gran medida muchos tipos de problemas al momento de seleccionar la ruta. Por medio de un análisis de la red disponible, hacen posible la planificación de rutas y la optimización de los recorridos para reducir la distancia recorrida, gracias al uso de algoritmos de optimización de rutas de transporte, lo cual reduce los costos de operación y mejora la eficiencia al momento de prestar el servicio (Kumar, et al, 2014).

Las rutas de transporte escolar deben modificarse constantemente para poder ser adaptadas a las necesidades de los alumnos. En la planificación de rutas de transporte escolar se debe considerar la minimización de tiempo de transporte, la disminución o eliminación de los riesgos de circulación (cruces peligrosos, pasos a nivel, entre otros), así como la reducción de costos económicos (Segui, et al, 2002).

En el ámbito de la selección de rutas del STE, existen diferentes tipos de sistemas de planeación, que se han desarrollado para tratar de optimizar el servicio, como a continuación se muestran (Nayati, 2008).

Planeación de Rutas

Con la finalidad de reducir tiempos de traslado de modo que se obtenga un plan de ruta se emplean diferentes métodos y algoritmos matemáticos como:

Modelos Matemáticos

Existen diferentes tipos de los modelos matemáticos que sirven como apoyo para la planeación de rutas, dentro de los cuales se encuentran el “Problema del Agente Viajero” y el “Problema de Ruteo de Vehículos” (PRV).

El primer modelo de “Problema del Agente Viajero” consiste lograr programar las visitas en un solo recorrido de la ruta a todos los clientes que esta incluye, por lo que se debe establecer un trayecto optimizado, lo que quiere decir que se debe reducir la distancia total del recorrido, el

tiempo y el costo. En este modelo matemático solo se cuenta con un vehículo, el cual debe realizar todas las visitas a los clientes maximizando la misma ruta. (Sandoya, 2010).

Por otro lado, en el modelo de “PRV” se cuenta con un número determinado de vehículos, los cuales deben atender varios clientes dispersos en la ciudad. En este modelo supone la existencia de una matriz en la que iniciaran y finalizaran los recorridos, se busca lograr como principal objetivo minimizar los costos por medio de la ruta más óptima.

Los modelos matemáticos ayudan a la planeación de rutas, ofreciendo así varias posibilidades, según sea el problema que se desea resolver y el modelo que se desea utilizar. Para la selección del modelo, se

deben considerar ciertos aspectos como las condiciones a las cuales se desea adaptar el modelo, tener claro que es lo que se requiere optimizar o solucionar y que restricciones se pueden presentar. (Ghiani, 2004).

Algoritmos Matemáticos

Existen diferentes tipos de algoritmos para dar solución a problemas de planeación de rutas. Entre los que destacan los heurísticos, los meta-heurísticos y los exactos.

Los algoritmos heurísticos realizan varios ensayos o repeticiones antes de llegar a una solución esperada. Se utilizan más generalmente cuando no existe una solución óptima bajo los parámetros dados (tiempo o

espacio, entre otros) o cuando no existe del todo una solución óptima. Mientras tanto los algoritmos meta heurísticos encuentran soluciones aproximadas en un sentido de nivel superior utilizando algoritmos heurísticos ya existentes.

Los algoritmos exactos realizan búsquedas detalladas que consisten en evaluar todas las soluciones disponibles hasta encontrar la mejor. Si no se conoce el valor correspondiente a la mejor solución global entonces no existe manera de comprobar que se ha encontrado en realidad la mejor solución de todas a menos que se examinen todas las que hay (Ortiz, 2010). En la Tabla 3, se muestra la clasificación según el tipo de algoritmo y una breve descripción del mismo.

Algoritmo	Clasificación	Descripción
Colonia de Hormigas	Meta heurística	Este Algoritmo tiene fundamentos en base al comportamiento de las hormigas; consta en que un grupo de hormigas buscan distintas rutas, dejando un rastro de feromona que indica a las demás hormigas las rutas más eficientes, así hasta encontrar la ruta más óptima; el funcionamiento de este algoritmo trabaja de manera similar busca minimizar el número de vehículos y el tiempo de entrega. (De la rosa, et al., 2009)
Genéticos	Meta heurística	Busca y selecciona las soluciones ya propuestas del problema y se trata de mejorarlas, el objetivo de los algoritmos genéticos es combinar dos soluciones y hacerla más eficiente. (Muñoz, et al., 2009)
Búsqueda Tabú	Meta heurística	Genera una memoria en la cual se registran las soluciones más eficientes, y así realiza un recorrido para ir descartando soluciones hasta llegar a la solución correcta. (De la rosa, et al., 2009)
Ahorros de Clarke and Wright	Heurística	Busca la fusión de dos rutas, en una misma que sea más eficiente y así lograr un ahorro en la distancia la distancia que se va recorrer. (Muñoz, et al., 2009)
Ramificación y Acotamiento	Exacto	Este algoritmo consiste en formar ramificaciones, donde las ramas finales tienen todas las soluciones posibles al problema, si en un nodo del árbol no se requiere más ramificaciones es porque ya no es una solución eficiente y se poda. (Muñoz, et al., 2009)
Dijkstra	Heurística	Este algoritmo busca la ruta más corta desde el nodo de origen hacia los demás nodos. (Muñoz, et al., 2009)

Tabla 3. Clasificación y descripción de algoritmos.

Ciertos algoritmos en conjunto con modelos matemáticos son utilizados para la elaboración de software, un ejemplo de uno de ellos es el Arc GIS, es una plataforma que sirve para recopilar, organizar, administrar, analizar información geográfica, en la cual una de las herramientas de planificación de rutas llamada “network Analyst” utiliza el

algoritmo de Dijkstra, el cual busca la trayectoria más corta entre el nodo de origen y los demás nodos.

La utilización de algoritmos en la planeación de rutas óptimas o cercanas a las óptimas, puede llegar a obtener ahorros importantes de costos y tiempo que van desde el 5% hasta el 20% (Diaz, 2009).

Metodología

La búsqueda fue realizada en la base de datos de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, (UACJ) en conjunto con la base de datos de EBSCOHOST Y ASCE además de fuentes en línea, permitió recabar los conocimientos necesarios, mismos que se plasmaron en este artículo.

Conclusión

Para optimizar un sistema de transporte, se debe tomar en cuenta los aspectos que se quieren analizar y optimizar. Dependiendo de los factores que se deseen mejorar, serán los aspectos que se tomarán en cuenta y los resultados variarán de acuerdo a estos aspectos. La utilización de herramientas tales como modelos matemáticos, algoritmos, GPS y ITS, para la búsqueda de soluciones eficientes para la planeación de rutas ha sido en gran medida un avance muy importante, ya que en conjunción con diferentes aplicaciones se han desarrollado programas (software) para resolver problemas de ruteo lo cual hace muchas más eficiente y preciso los cálculos para la optimización de rutas. Si la meta es diseñar rutas cortas y rápidas se recomienda utilizar Sistemas de Información Geográfica para un mejor entendimiento del sistema de transporte. ArcGIS es un software que puede ayudar a la optimización de rutas que va desde la revisión de consumo de combustible y el ahorro de tiempo.

Se pueden asignar terminales de parada ubicando a los usuarios del servicio de manera geográfica para evitar una deficiencia, generando una ruta que tenga una demanda adecuada de usuarios para que su capacidad se encuentre en niveles óptimos.

Referencias

- Acha Daza Jorge, Espinosa Rescala Juan Carlos. (2004) Hacia una Arquitectura Nacional Para los Sistemas Inteligentes de Transporte. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 251, ISSN 0188-7297 Sanfandila, Qro.
- Cueva Montero Elizabeth Alejandra. (2011). prototipo de sistema de administracion y planificacion automaticas de rutas optimas para expresos escolares de instituciones educativas. Guayaquil, Ecuador. Escuela politecnica Superior del litoral.
- De la Rosa González Manuel, Urbano Martínez Norma, González García Venancio, Eleuterio Alejo Roberto. “Estudio de Tres Algoritmos Heurísticos para Resolver un Problema de Distribución con Ventanas de Tiempo: Sistema por Colonia de Hormigas, Búsqueda Tabú y Heurístico Constructivo de una Ruta”. 2009.
- Diaz Parra Ocotlan, Cruz Chavez Marco Antonio, Dmaris Galvan Montiel, Crispin Zavala Diaz. (2006).Técnicas de modelacion de sistemas blandos aplicados al sistema transporte escolar. Cuernava Morelos, México. Editorial ACD 2006, PP 47-59, ISBN: 968-878-273-4.
- Gianpaolo Ghiani, Laporte Gilbert, Roberto Musmanno. “Introduction to Logistics Systems Planning and Control”. England: John Wiley & Sons Ltd. 2004.
- Gonzalez romero Antonio, Arcos Santiago Moisés. (2012). SIG Libre para la Gestión de Rutas Escolares. Sevilla.
- Instituto Mexicano del Transporte. (1992). Capacidad de Transporte Publico en Autobus Interurbanos y Suburbanos. Queretaro, Qro. Publicacion Tecnica No. 15 ISSN 0188-7297.
- Instituto Municipal de Planeación. (2010). Diagnostico final de transporte escolar en la Ciudad de Leon Guanajuato.
- Jie Li, Wei Wang, Xuwu Chen, Van Zuylen Van Henk, Hao Wang. (2009). Optimal Scheduling for Public Transport Corridor. China: ASCE.
- Khader Nayati Mohammed Abdul. (2008). School Bus Routing and Scheduling using GIS. University of Glvae, Departament of Technology and Built Environment
- Kumar N, Kumar M., Denis D.M.*, Srivastava S. K., Srivastva O.S. (2014). Geospatial School Bus Routing. The International Journal of Engineering and Science (IJES) Vol. 3, pp 80-84, ISSN: 2319 – 1813.
- Ladeira Maria, Michel Fernando, Senna Luis. (2011). Public Transport Monitoring and Control: The Case of Porto Alegre, Brasil. Brasil: p. 275-281. ICTIS
- Liu Chao-Lin. (2002). Best-Path Planning for Public Transportation Systems. Singapur: Conference On Intelligent Transportation Systems
- Molina Mario. (2012). Evaluación de beneficios ambientales y de movilidad por la aplicación del Programa de Transporte Escolar en la Ciudad de México.
- Moreno Arboleda Francisco Javier ,Arango Isaza Fernando, Echeverri Arias Jaime Alberto. (2010). Trayectorias con una ruta predefinida en una bodega dedatos:un caso de estudio sobre transporte publico. Revista Ingenierias Universidad de Medellin, Vol. 9, No. 16, pp 113-121, ISSN:1692-3324.
- Muñoz Bermeo Elver A., Sotero Calderón Jaime Hernan, “Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte”. El Hombre y la Maquina, (32), 52, 67. 2009.
- Rodríguez Ortiz Carlos, “Algoritmos heurísticos y metaheurísticos para el problema de localización de regeneradores”. Proyecto fin de carrera. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid, España. 2010.
- Rojas, J. S. (2010). Aplicación de un Modelo de Optimización en la Planeación de Rutas de los Buses Escolares del Colegio Liceo de Cervantes Norte. Facultad de Ingeniera Departamento de procesos Productivos Bogotá.
- Sandoya Fernando (2010). “Métodos Exactos y Heurísticos para resolver el Problema del Agente Viajero (TSP) y el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP)”. Decimocuartas Jornadas en Estadística e informática. Guayaquil, Ecuador.
- Segui Pons, J. M., Ruiz Pérez, M., Guiata Mas, F. Escalas, F., Bauza, A. (2002). SE. España: p. 58-76. ISSN: 1578 México 5157.
- Spada Michela, Bierlaire Michel, Liebling Thomas. (2003). Decision-aid Methodology for the School Bus. Swiss Transport Research Conference
- Stojanovski Todor. (2013). Public Transportation Systems for Urban Planners and Designers: The Urban Morphology of Public Transportation Systems. Estocolmo, Suecia: Royal Institute of Technology, Traffic and Logistics.

Problemática en Intersecciones Viales de Áreas Urbanas: Causas y Soluciones

Gerardo Hernández Betancourt ¹, Dr. José Osiris Vidaña Bencomo ², Mtro. Alberto Rodríguez Esparza ³

¹Estudiante del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

^{2,3}Docente del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Resumen

El presente artículo aborda los problemas viales generados debido al crecimiento desenfrenado del parque vehicular en zonas urbanas, estrategias inadecuadas de gestión del tráfico, así como la mala planificación urbana y de transporte. De tal forma se determinó que los estudios de capacidad vehicular y niveles de servicio son la mejor opción para evaluar y definir una solución acorde a las características que se presenten en el proyecto ya sea mediante el uso de rotondas, pasos a desnivel, semaforización de los cruces o implementación de diferentes arreglos geométricos.

Palabras clave: Tránsito vehicular, congestión, arreglos Geométricos, niveles de servicio.

Introducción

Para resolver los graves problemas de tránsito en diferentes zonas urbanas, expertos apuestan por el mejoramiento de las intersecciones viales, ya que éstas al contar con una sobresaturación de vehículos en los cruces generan: problemas tanto en el tiempo que tiene cada conductor para llegar a su destino; en el costo económico al estar un largo periodo de tiempo en el tránsito; en la contaminación debido a las emisiones de los vehículos de combustión y por los problemas sociales que se crean por el aumento de estrés. Este tipo de problemas es cada vez más notorio con el aumento del parque vehicular de cada ciudad que a la

vez demandan un mayor número de sistemas de control en intersecciones de la red vial dando como resultado un aumento en las demoras de viajes interurbanos ocasionados por estos sistemas.

Es por eso que, la ingeniería de tránsito busca atender esta problemática enfocándose de manera continua en la optimización de operación del flujo vehicular en intersecciones por medio de los diseños geométricos de las vialidades, el uso de rotondas, pasos a desnivel o semaforizaciones que puedan satisfacer la demanda vehicular en una intersección y

con ello poder minimizar o mitigar los problemas que se presenten.

El congestionamiento de tránsito, representa en la actualidad un gran reto a resolver debido al número de usuarios cada vez mayor que necesitan transportarse. Esta situación se agudiza debido a que el transporte no es exclusivo de los usuarios, ya que productos que se consumen o comercializan también necesitan ser transportados. Por lo que esto afecta también el incremento de vehículos que transitan por las ciudades.

La repercusión que tiene el incremento de vehículos automotores con el aumento del número de accidentes viales se analizan ampliamente para identificar las causas de la accidentalidad, destacándose las que son consecuencia de un mal diseño de las vías urbanas y las que se deben a una falta de criterios sobre seguridad vial para una mejor adaptación de sistemas de control

vehicular, tal y como menciona (Pérez, 2013).

En lo que respecta a congestionamiento, es tentativo pensar que un incremento en la infraestructura vial conlleva necesariamente a una mejora en la fluidez vehicular, pero no siempre es así. El mal diseño de infraestructuras viales y el uso de controladores de tránsito, obsoletos e ineficientes, son las principales causas que han ocasionado que varias ciudades en el mundo presenten problemas serios de transporte, por lo que últimamente se han presentado nuevas estrategias e intensificado los estudios sobre tránsito vehicular en sistemas viales, buscando agilizar la movilidad vehicular apoyándose de la capacidad, la topografía, los conocimientos, las condiciones de mejorar la vida de la red vial y también con la necesidad de disponer de un instrumento idóneo para afrontar la solución de la actual problemática.

Intersecciones a Nivel

Se denomina como intersección a nivel, al área que es compartida por dos o más caminos y cuya función principal es posibilitar el cambio de dirección de la ruta. La intersección a nivel varía en complejidad desde un simple cruce, con sólo dos caminos que se cruzan entre sí en ángulo recto, hasta una intersección más compleja, en la cual se cruzan tres o más caminos dentro de la misma área (Highways & Streets, 2001).

Las intersecciones a nivel resultan ser muy

convenientes porque presentan mayor facilidad de proyecto y construcción, requieren menor superficie para alojarlas y además son más económicos que otras alternativas tales como puentes, túneles o desniveles. Sin embargo, los problemas en este tipo de intersecciones se generan cuando el flujo vehicular aumenta y el tipo de intersección no tiene la capacidad de servicio requerida pues ocasionan congestionamientos en horas pico.

Existen dos factores importantes que determinan

problemas en intersecciones viales. Uno de éstos es la evidencia física de la congestión de tránsito, que en la actualidad muestra puntos críticos y se convierte en prioridad. El otro, es el resultado de la proyección del flujo que arroja un aumento para los próximos años (Uribe, 2009).

Los procedimientos que ayudan a mitigar los problemas en intersecciones a nivel pueden ser variados yendo desde el cambio del arreglo geométrico de la intersección hasta el desarrollo de sistemas complejos como lo son distribuidores viales.

Para definir la implementación del procedimiento para mitigar los problemas en las intersecciones viales es importante identificar de manera general las

condiciones de operación actuales de la intersección a nivel. Estas condiciones son la infraestructura vial de la zona de estudio, sentidos de circulación de las vialidades que la conforman, uso del suelo donde está ubicada, condiciones de estacionamiento cercana a ella, identificación de puntos de conflicto, condiciones de la superficie de rodamiento. Una vez identificadas esas condiciones particulares de la intersección será posible seleccionar las medidas que den solución a los problemas que se generan en ella. (Romero, 2009). Entre las medidas que se ajusten a estas necesidades se encuentran las glorietas, intersecciones semaforizadas y arreglos geométricos que modifican las trayectorias de los vehículos y finalmente pasos a desnivel.

Glorietas

Se entiende por glorieta un tipo especial de intersección caracterizado por que los tramos que en él confluyen se comunican a través de un anillo en el que se establece una circulación rotatoria alrededor de una isleta central (Bared, 2000).

En comparación con otros tipos intersecciones a nivel, tal y como lo menciona Bastos en su artículo, las glorietas responden de manera más eficientemente a múltiples funciones como la regulación del tráfico y la regeneración urbana y paisajismo. Las glorietas son particularmente populares para permitir las operaciones de flujo vehicular con el aumento de la seguridad a pesar de su excelente rendimiento. Por otro lado se

tiene que la experiencia internacional en los últimos 40 años ha demostrado que la construcción de una rotonda puede ser una tarea compleja. La indecisión del conductor y la incomprensión de las reglas de conducción pueden generar conflictos y accidentes en la calzada circulatoria. Estos accidentes, aunque no suelen ser graves, son frecuentes y, a menudo afectan el flujo de tráfico normal (Bastos, 2013).

Cuando recién comenzaron a implementarse este tipo de arreglos se expandieron velozmente por varias partes del mundo, pues su diseño permitía un flujo vehicular muy dinámico. En Alemania, las primeras glorietas comenzaron a utilizarse en los años 30, sin embargo, en los años 60

cayeron en desuso por razones desconocidas diseñándose otras tipologías de intersecciones. A finales de los 80 apenas existían glorietas en Alemania. Fue en estos años cuando expertos en tráfico de Alemania comenzaron a experimentar con glorietas para controlar el tráfico, tanto en entornos urbanos, como rurales (Gasulla, 2011). La razón de porque se volvió a retomar este sistema fue porque gracias a los avances en la materia de transporte lograron identificar los problemas en cuanto a las velocidades, número de carriles así

como las entradas y salidas, lo cual permitió un mejor desenvolvimiento del tráfico en la zona.

En zona urbana no son recomendables las glorietas a excepción de los puntos de entrada en la ciudad, y siempre que los niveles de tráfico permitan su implantación por criterios de capacidad. La capacidad de la rotonda es fija y no es posible adaptarla a las posibles variaciones de tráfico, por lo que se deben diseñar con margen de capacidad suficiente.

Intersecciones Semaforizadas

Los semáforos son dispositivos de señalización mediante los cuales se regula la circulación de vehículos y peatones en las vías, asignando el derecho de paso de vehículos y peatones secuencialmente, por las indicaciones de luces de color rojo, amarillo y verde, operadas por un aparato electrónico de control de tráfico (SEDESOL, 2008).

El semáforo es un dispositivo útil para el control del tránsito y la seguridad de los usuarios del sistema de movilidad. Debido a la asignación, prefijada o determinada por el tránsito, del derecho de vía para los diferentes movimientos en intersecciones y otros sitios de las vías, el semáforo ejerce gran influencia sobre el flujo del tránsito. Por lo tanto, es de vital importancia que la selección del punto de instalación del control semaforizado, sea precedida de un estudio puntual y zonal de las condiciones del tránsito.

Con la ayuda del procesamiento de datos, comunicaciones y visualización de la capacidad vehicular dieron pie a la investigación de una estrategia de control del tráfico. Los esfuerzos de investigación posteriores produjeron versiones más amplias y mejoradas del paquete de software que implementa estos conceptos, ayudando a aplicarlo en diferentes lugares.

En el año de 1997, la Federal Highway Administration (FHWA) comenzó el desarrollo del proyecto de Sistemas de Control de Tráfico Urbano (UTCs). El sistema fue instalado en Washington, DC, y se utilizó para desarrollar, probar y evaluar estrategias avanzadas de control de tráfico. El sistema de semaforización contenía 512 detectores de vehículos cuyos resultados se utilizaron para determinar el momento de la señal en 200 intersecciones (Samuel, 1996). Gracias a la utilización de este sistema, los resultados fueron favorables ya que

disminuyo el número de accidentes, además de minimizar el tiempo de cada viaje.

Las Políticas Optimizadas para el Control Adaptativo (OPAC por sus siglas en inglés), es uno de los sistemas de control de la señal de semáforos desarrollado para trabajar en fase de pruebas en el condado de Middlesex, Nueva Jersey ya que en algunas de sus intersecciones se mostraba un alto número de accidentes. Este sistema tiene como particularidad proporcionar la

capacidad dual de control de intersección individualmente distribuido, en otras palabras, cada intersección se controla por si sola pero responde a una red general. Los primeros resultados indican que el sistema reduce el tiempo de viaje en un 27 por ciento y el número de paradas en un 55 por ciento evitando que el sistema este saturado durante el período pico largo de la tarde (Owen, 1997).

Arreglos Geométricos

Los arreglos geométricos en las intersecciones se encargan de determinar las características geométricas a partir de factores como el tránsito, topografía, velocidades, de modo que se pueda circular de una manera cómoda y segura. El diseño geométrico está compuesto por tres elementos bidimensionales que se ejecutan de manera individual, pero dependiendo unos de otros, y que al unirlos finalmente se obtiene un elemento tridimensional que corresponde a la vía propiamente. Estos son alineamiento horizontal, alineamiento vertical y el diseño transversal (Agudelo, 2002).

En Colombia el uso de nuevos diseños geométricos es parte del plan de movilidad. Las intersecciones tipo Diamante Divergente son un estilo especial de alternativa de diseño muy reciente en el mundo para la solución de conflictos viales, su funcionamiento básicamente consiste en un cambio regulado semafóricamente de los sentidos de flujo; hasta el momento su implementación en países de Latinoamérica es nulo, lo que supone un desaprovechamiento de sus beneficios (Porrás, 2011).

Pasos a Desnivel

Un paso a desnivel es un conjunto de ramales que se proyecta para facilitar el paso de tránsito entre unas carreteras que se cruzan en niveles diferentes. También puede ser la zona en la que dos o más carreteras se cruzan a distinto nivel para el

desarrollo de todos los movimientos posibles de cambio de una carretera a otra, con el mínimo de puntos de conflicto posible (Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, 2008)

Un claro ejemplo del mejoramiento del tránsito vehicular en una intersección muy congestionada con la ayuda de un paso a desnivel, es el del Puente Lord. Éste fue construido originalmente en 1959 en la ciudad de Lowell, Massachusetts. El puente está sobre una intersección formada por la calle Thorndike al norte y hacia el sur en Middlesex Street, considerada como unas de las calles más transitadas. El Puente Lord ha ayudado desde hace más de 50 años a los habitantes de la región a llegar más rápido ya que desde su construcción minimizo tiempos de espera en los cruceos, así como

accidentes de tráfico y embotellamientos (Chris, 2015).

Colocar puentes o pasos a desnivel en áreas donde el flujo vehicular sobrepasa la capacidad de la vía ayuda a la movilidad de la misma, pero si no se tienen medidas de seguridad en cuanto a las restricciones de carga puede llegar a ser peligroso.

Es muy común en lugares donde se tiene facilidad de espacio se coloquen grandes obras como puentes o pasos a desnivel para agilizar el flujo ya sea en una o ambas direcciones del cruce.

Metodología

Para la realización de este documento se llevó a cabo una investigación previa en diferentes bases de datos, algunas de ellas siendo ScienceDirect, EbscoHost, ASCE, ELS y JSTOR, esto para la obtención de artículos de investigación relacionados con el tema propuesto para el proyecto de titulación.

Conclusiones

El presente artículo es una propuesta donde se establecen de manera secuencial, los criterios y parámetros para obtener la solución más viable, más económica y sobretodo más funcional a un problema vial en las redes urbanas a través del mejoramiento de las intersecciones viales. Es responsabilidad, entonces, del diseñador geométrico calcular las intersecciones viales tomando como dato de entrada el resultado de todo un estudio previo que involucre el factor social, ambiental y económico, para que satisfaga integralmente los requerimientos de este trabajo.

El análisis de cada uno de los factores que influyen en cada proyecto es importante para el desarrollo de una vía, tomando en cuenta las condicionantes o factores existentes y la distribución geométrica tridimensional la cual de alguna forma complacerá al máximo los objetivos fundamentales que se buscan cumplir, es decir, la integración en su entorno, armonía o estética, la seguridad, la funcionalidad, la comodidad y la economía; buscando minimizar los conflictos potenciales generados por el aumento de los vehículos, autobuses,

camiones, bicicletas, así como la reparación o cierre de vías, mientras se busca la manera de solucionar la comodidad de que la gente que circula por dicha intersección.

La funcionalidad vendrá determinada por el tipo de vía a proyectar y sus características, así como por el volumen y propiedades del tránsito, permitiendo una adecuada movilidad por el territorio a los usuarios y mercancías a través de una suficiente velocidad de operación del conjunto de la circulación.

La seguridad vial debe ser la premisa básica en cualquier diseño vial, inspirando todas las fases del mismo, hasta las mínimas facetas, reflejada principalmente en la simplicidad y uniformidad de los diseños.

La comodidad de los usuarios de los vehículos debe incrementarse constantemente para ayudar a la mejora general de la calidad de vida, disminuyendo cualquier incomodidad que puedan presentar los ocupantes de los vehículos. Todo ello ajustando las curvaturas de la geometría y sus transiciones a las velocidades de operación por las que optan los conductores a lo largo de los alineamientos.

La composición en su entorno debe procurar minimizar los impactos ambientales, teniendo en cuenta el uso y valores de los suelos afectados, siendo básica la mayor adaptación física posible a la topografía existente.

Referencias

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2001). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. Unites States: AASHTO.
- Bared, J.G., & K. Kennedy. "Safety Impacts of Modern Roundabouts," Capitulo 28, The Traffic Safety Toolbox: A Primer on Traffic Safety, Institute of Transportation Engineers, 2000.
- Bastos Ana, Vasconcelos Luis & Santos Silvia. (2013). Moving from Conventional Roundabouts to Turbo-Roundabouts. ELSERVIER, 111, 147. Marzo 25, 2015, De ScienceDirect Base de datos.
- Bor-Shong Liu. (2006, Julio). Association of intersection approach speed with driver characteristics, vehicle type and traffic conditions comparing urban and suburban areas. ELSERVIER, 39, 216-223. 2015, Marzo 11, De ScienceDirect Base de datos.
- Larry E. Owen, Charlie M. Stallard and Deborah M. Glitz. An Evaluation of Real-Time Traffic Adaptive Control Prototypes (1997). TRB
- Lowell City Council, (2015). Lord Overpass: A 150 Year History (p. 1). Lowell: Chris.
- Martin Gasulla, M. (2011). Estudio y mejora de la capacidad y funcionalidad de glorietas con flujos de tráfico descompensados mediante microsimulación de tráfico. Aplicación a la intersección de la CV-500 con la CV-401, en El Saler (T.M. Valencia). Licenciatura. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.
- Min-Wook K., Manoj K. & Paul S. (2011, Septiembre 27). Applicability of highway alignment optimization models. Elsevier, 130, 30. 2015, Febrero 28, De ScienceDirect Base de datos.
- Ministerio de Transporte (2008). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Colombia.
- Pérez F., Bautista A., Salazar M. & Macías A. (2014, Abril). Análisis del flujo de tránsito vehicular a través de un modelo macroscópico. DYNA, 81, 36-40. 2015, Marzo 08, De ScienceDirect Base de datos.
- Peter Samuel. Peak Traffic Problems Reduced (1996). ITS international.
- Porras H. & Martínez Y.. (2011, Marzo 4). Intersecciones tipo diamante divergente, análisis de implementación en ciudades colombianas. Tecnum, 15, 10-23. 2015, Febrero 27, De EbscoHost Base de datos.
- Posada Henao, J. (2002). Diseño Geométrico De Vías. Maestría. Universidad Nacional De Colombia – Sede Medellín Facultad De Minas.
- Rolón, Roció. Diseño geométrico de vías urbanas. Tesis (Área de estudios del transporte). Buenos Aires, Argentina, Universidad Nacional, Centro de Investigaciones Viales LEMAC, 2006. 3 p.
- Secretaria de Desarrollo Social, Dirección General De Ordenación del Territorio (2008). "Programa de asistencia técnica en transporte urbano para las ciudades medias mexicanas". México.
- Valles Romero, José. Análisis de alternativas de mejora vial a la infraestructura física en el municipio de ciudad Nezahualcóyotl, Edo. De México. Tesis (Transporte). Edo de México, México, Universidad Autónoma del Estado de México, 2009. 5 p.
- Vidaña J. & Rajbhandari R. (2011, Diciembre 16). Development of a Large Scale Traffic Simulation Model to Improve the Flow of Commercial Vehicles from Maquiladora Industry to International Border- Crossings. World Road Association, N/A, 16. 2015, Marzo 11, De TRID Base de datos.

Análisis para la implementación del modelo *Lean* en el sector de la construcción

J. A. Ramos¹, Dr. César Dávalos², Dr. Abraham López², Mtro. Alberto Rodríguez²

¹Estudiante del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

²Docente del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Resumen

La industria de la construcción representa una de las mayores actividades económicas del mundo, y en México no es la excepción, dejando una derrama económica significativa en el producto interno bruto del país. Sin embargo, el sistema de producción empleado durante años se hace cada vez más deficiente, reduciéndose su índice de productividad, mientras que en la de manufactura éste se ha incrementado. En el presente artículo se analizan algunos casos de estudios del Sistema *Lean Construction*, basado en el sistema de producción Toyota para la manufactura de carros.

Palabras clave: Construcción, Lean Construction, Administración

Introducción

En los últimos años el mundo ha experimentado cambios tecnológicos, ambientales, sociales, entre otros, que obligan a las industrias a replantearse el modo en que desarrollan sus productos. La industria de la construcción, en particular, presenta un rezago en sus métodos constructivos, implementando muy pocos cambios al sistema tradicional. Esto no ha funcionado, exhibiendo muchas fallas, entre las cuales están: la falta de calidad, falta de coordinación, fallas de seguridad, incumplimiento del plazo de entrega, por mencionar algunas.

La industria manufacturera ha sabido adaptarse a estos cambios mediante diversas técnicas para aumentar su

productividad, creando distintos métodos que se basan en varias herramientas que ayudan a realizar el trabajo en un menor tiempo, un menor costo y bajo un ambiente de seguridad. En este artículo se discutirá sobre el modelo *Lean*, un modelo desarrollado originalmente para la producción de automóviles (Krafcik, J., 1988), y que más tarde se adecuó a la industria de la construcción (Koskela, L., 1992, Biton, N. & Howell, G., 2013).

El modelo *Lean* tiene sus orígenes después de la segunda guerra mundial, cuando Japón estaba en un periodo de crisis social y una recesión económica muy severa. Sus industrias debían reinventarse para lograr una mayor productividad.

Toyota Motor Company, una compañía que producía 1000 coches al mes (Womack, J., 1992), era pequeña en comparación con las grandes empresas manufactureras de automóviles –como Ford, General Motors y Chrysler– por lo que el modelo de producción en masa que se usaba en estas fábricas no era el más adecuado para la compañía. Toyota necesitaba diseñar un modelo que permitiera reducir el espacio de su manufactura, la mano de obra, la inversión en herramientas de producción y el tiempo para terminar el producto (Ibarra, L., 2011). Con estos antecedentes, el ingeniero Taiichi Ohno visitó durante tres meses la fábrica de Ford, identificando que el sistema de producción en masa no se podía ajustar a las necesidades japonesas. Así, puso en marcha nuevas ideas para obtener una mayor eficiencia sin hacer crecer el volumen, ya que no podían venderlo, teniendo como resultado el

Sistema de Producción Toyota, que se puso en marcha en 1962.

Este sistema no tuvo mucha popularidad, sino hasta la década de 1970, cuando comenzó la crisis del petróleo. Las empresas no tenían como solventar las grandes cantidades de productos que requerían para una producción en masa, por lo que empezaron a decaer; sin embargo, Toyota crecía a un ritmo estable. Esta condición hizo que la industria manufacturera revisara el sistema de producción Toyota.

En cuanto a la construcción, los principios de *Lean* se remontan a principios de la década de 1990, presentada por Lauri Koskela en su documento “*Application of the new production philosophy to construction*” (Koskela, L. 1992). En éste se habla de cómo los principios del modelo *Lean*, aplicado principalmente en el sector automovilístico y de manufactura.

Situación actual

En México actualmente la industria de la construcción genera 5.6 millones de puestos de trabajo directo y 2.8 millones indirectos (CMIC, 2013). En 2012 fue la tercera actividad económica con mayor capacidad de generación de empleo y aportó el 6.3 % al PIB total de la economía nacional. En 2014 se generaron 436,519, 453 millones de pesos en obra en todo el país, de los cuales 191,582, 373 pertenecen a obra de tipo Edificación – cerca del 45% (CMIC, 2014).

Con estos datos se puede percibir la importancia de la industria de la

construcción en México, dejando una derrama económica importante y generando millones de empleos directos e indirectos. Por otro lado, se observa que esta industria presenta un carácter tradicionalista con gran dificultad para incorporar cambios en sus procedimientos. Esto debido a la costumbre a trabajar de la misma manera durante años, contemplando su metodología como el único camino viable para terminar su producto.

El modelo *Lean Construction (LC)* contiene herramientas que generan

beneficios importantes en el ámbito económico, social y ambiental; prueba de esto es la implementación en diversos países como Estados Unidos, Brasil, Chile, Inglaterra (Pons, J. 2014).

En Brasil se efectuó un caso estudio a tres de las principales compañías en el estado de Goiás (do Amaral, *et al.*, 2012), con el fin de determinar si alguna de éstas presentaba en su producción principios del *LC*. Estos principios, establecidos por Koskela, son los siguientes:

1. Reducir la proporción de las actividades que no aportan valor añadido.
2. Incrementar el valor del producto/servicio a través de la consideración sistemática de requisitos del cliente.
3. Reducir la variabilidad.
4. Reducir el tiempo o ciclo de producción.
5. Simplificar las cosas a través de la reducción de etapas, pasos y partes.
6. Aumentar la flexibilidad de salida.
7. Aumentar la transparencia del proceso.
8. Control del enfoque en el proceso global.
9. Introducir mejora continua del proceso.
10. Balance en las mejoras del flujo de producción y sus cambios.
11. Realizar Benchmarking.

En particular, do Amaral, *et al.*, identificaron que en las primeras dos compañías, los principios menos utilizados fueron del 5-7. Observaron que hay escases de planeación para evitar un choque entre los equipos de trabajo, falta de elementos prefabricados, de maquinaria y de materiales para terminar la obra a tiempo, carencia de alternativas a ofrecer al cliente. Así mismo, se carecía en la obra información acerca de instrucciones para ejecutar el trabajo.

El principio 3, según do Amaral, *et al.*, es aquél que más se aplicaba en las

primeras dos compañías. Esto debido a certificaciones externas que los obligan a mantener una buena organización en el sitio de trabajo, como lo es la identificación correcta de los materiales

En la tercera compañía, no se presentó ningún principio muy bajo, siendo la aplicación de éstos entre intermedia y alta. Esta compañía mostró un plan en donde la distribución del material estaba preferentemente cerca del sitio de construcción, y sus rutas de distribución definidas con antelación (do Amaral, *et al.*, 2012). Para atender los requisitos del cliente generaron estudios de mercado identificando que tipo de proyecto se implementaría.

Como conclusiones, do Amaral, *et al.*, indican que si bien en las dos primeras compañías no se había establecido el método *LC*, de manera explícita, se habían implementado sus principios por necesidades presentes en sus procesos. Por otro lado, la tercera compañía, tenía conocimiento sobre los principios de *LC*, demostrando que sabiendo aplicar esta metodología se pueden minimizar muchos problemas presentes en la obra de construcción. Otro caso de estudio se presenta en “*Enhancing Australian housing affordability: off-site manufacturing supply chain strategies*” (Mostafa, *et al.*, 2014). En éste se destaca sobre los costos elevados que se tienen al construir una casa, problemática que se tiene en la mayoría de los países, generando una dificultad sobre todo en los jóvenes para adquirir su propio hogar.

Mostafa, *et al.*, proponen la construcción de casas prefabricadas, ensambladas fuera de la obra, como solución a este problema. Los beneficios de usar casas de este tipo son varios, principalmente la reducción de costos y de bajo impacto ambiental. Para lograr esto, los autores en la Ref. (Mostafa, *et al.*, 2014), centran su producción en un modelo de *LC*.

En la construcción de las casas prefabricadas, se pueden usar todas sus herramientas, quitando actividades que no generan valor adicional, además de beneficiar al medio ambiente.

La manufacturación de casas prefabricadas es una propuesta para solucionar la problemática de la demanda de casas presente en muchas regiones del mundo, incluyendo a México, donde la población ha aumentado a tal grado que la renta de casas es muy costosa (debido a la demanda) siendo casi imposible adquirir una vivienda. Por esta razón, las herramientas y principios que maneja el sistema *Lean*, indican que son adecuadas para la industria de la construcción, no sólo para elementos prefabricados, sino para cualquier rama de ésta.

Sustentabilidad

Otro de los compromisos del sistema *LC* es la sustentabilidad; la industria de la construcción deja muchos desperdicios y por lo tanto tiene un gran número de contaminantes. Se ha identificado que la industria de la construcción es una de las que más contribuyen en cuestión de desperdicios, ejemplo es la de E.E.U.U., donde este sector acapara el 39% del total de energía producida, el 12% del consumo de agua y 68% de electricidad y es el causante del 38% de las emisiones de dióxido de carbono (Nahmens I., *et al.*, 2012).

Nahmens, *et al.*, describen los tres diferentes conceptos que forman la sustentabilidad en la metodología *Lean* aplicada a la construcción, dividiéndola en un aspecto social, ambiental y económico. La herramienta de la que se basa la sustentabilidad en *LC*, es llamada *kaizen*, que busca minimizar los desperdicios; y a

su vez, la reducción de desperdicios trae como consecuencia la sustentabilidad.

En el aspecto social de *LC* se incluye el cambio climático, la salud humana, los cambios en los ecosistemas, la deterioración de la infraestructura, entre otras. Las vidas humanas son consideradas las más importantes dentro de este aspecto; se ha comprobado que en aquellas compañías donde se han aplicado estas técnicas se han reducido los accidentes laborales considerablemente (Nahmens, I., *et al.*, 2012).

Respecto al aspecto ambiental, la industria de la construcción es de las principales contaminadoras debido al alto consumo de energía y al volumen de sus desperdicios. Entre estos, se encuentran los desperdicios de energía, de agua, de materiales, de transporte, así como la

generación de emisiones y contaminantes, o la destrucción de la biodiversidad.

Económicamente, hacer los cambios pertinentes y minimizar el control de

desperdicios impacta directamente en el presupuesto inicial.

Liderazgo

Todas las aplicaciones de *LC* pueden llevarse a cabo, pero el mayor problema en su implementación recae en la falta de un liderazgo adecuado. Gao Shang, (Chang, G., 2014), presenta un análisis del liderazgo aplicado en Toyota, empresa donde empezó el sistema Lean.

En esta empresa se contempla que los líderes de equipo no sólo arreglen los problemas presentados, sino que sean instructores. De esta forma, Toyota logra que todos los trabajadores conozcan las herramientas de operación, interiorizando que los problemas provienen, en lo general, desde la producción.

Una diferencia que se destaca entre los líderes que llevan o no esta filosofía, (Shang, G., 2014), es que el primero no busca resultados rápidos, sabedor de que el proceso adecuado traerá los resultados deseados, mientras que el segundo contempla obtener resultados a cualquier costo.

En un sistema *Lean*, se debe generar una visión cuyo propósito se base en contribuir a la sociedad. Para lograrlo, es necesario que todos los empleados sepan el camino que quiere seguir la empresa y las herramientas que utilizará para lograrlo.

Implementación

En su implementación, los desafíos y barreras que se pueden presentar son: falta de conocimiento de sus beneficios y su significado; falta de información; creencia de la necesidad de una gran inversión de tiempo; una escasa o pobre comunicación; falta de colaboración entre promotores, constructores, clientes y consultores externos; dificultad para hacer coincidir intereses de las diferentes partes; falta de normas o estándares; y un cambio de

pensamiento y comportamiento que no todos aceptan (Pons J., 2014).

El reto para implementar la metodología *LC* está en quitar todas estas barreras y encontrar la manera en que se pueda adaptar un modelo que originalmente fue planteado para la industria manufacturera. En el artículo "*Lean Construction: where are we and how to proceed?*", (Bertelsen, B., 2004), se presentan dos estrategias para su implementación. La primera es definir el

sector de la construcción como una de manufactura; concientizando de la concatenación de todos los procesos constructivos, consiguiendo controlar de mejor manera la calidad, la seguridad y los tiempos de entrega.

La segunda estrategia es entender la construcción como un proceso, siendo los clientes un sistema complejo, temporal, que proporciona requisitos y decisiones en un flujo impredecible.

Tradicionalmente, la construcción siempre se ha considerado como un sistema único. Koskela propuso la construcción como un sistema de producción, basado principalmente en eliminar desperdicios. Uno de los frenos para entender esta percepción es en su manera de implementación. Al igual que todos los proyectos de construcción, el concepto de *LC*, se adapta según las necesidades y objetivos del proyecto y de las empresas. No obstante, existen herramientas establecidas para entender mejor la implementación gracias al Lean Project Delivery System (LPDS). Se trata de un enfoque por etapas que comprende la definición de proyecto, el diseño, el suministro, el montaje o ejecución y el uso y mantenimiento posterior del edificio, instalaciones o infraestructura (Pons, J., 2014).

Las fases que conforman un proyecto Lean, según el LPDS, son:

- Fase de definición del proyecto
- Fase de diseño Lean
- Fase de suministro Lean
- Fase de uso y mantenimiento

En la fase de definición del proyecto, los colaboradores clave deben tener una comunicación directa. El equipo de diseño, trabaja con los propietarios o promotores para concretar el propósito y traducir ese propósito en requisitos específicos. Durante esta fase, el propietario determina el coste permitido para el proyecto y el equipo de diseño se compromete en respetar sus costes teóricos, que son menores que los costes autorizados.

En la fase de diseño, el equipo crea varias alternativas, basadas en los requisitos de diseño, las restricciones del proyecto y el coste objetivo. El objetivo es encontrar la alternativa de diseño que mejor cumpla los planes del propietario y entregar el máximo valor al cliente. Cuando los equipos pueden colaborar en esta fase, muchos de los costes pueden ser eliminados o minimizados; esos ahorros satisfacer más necesidades del cliente.

Para definir el suministro en esta metodología es necesario facilitar la entrega *just-in-time* de los materiales en la obra. Se requiere definir el diseño del producto y del proceso para poder contar con los materiales y cantidad de mano de obra en la cantidad necesaria en las etapas correctas.

La ejecución de obra *Lean* se inicia con la entrega de información, materiales, mano de obra, herramientas, o componentes que se utilizaran para la ejecución en la obra y termina con el cumplimiento de las instalaciones y puesta en marcha del edificio o infraestructura. Durante esta fase, el sistema del último planificador se utiliza para controlar la producción y mantener el flujo continuo de materiales e información a

lo largo de toda la obra a medida que esta avanza.

La ejecución concluye cuando el cliente tiene un uso fructuoso de la instalación o edificio, que se produce

después de la entrega y puesta en marcha del edificio, instalación o infraestructura. Esta fase termina con el cierre de la obra, los retoques definitivos, y la utilización y mantenimiento del edificio o instalaciones.

Metodología

Para realizar este artículo, utilice como fuentes artículos científicos de distintas bases de datos, muchos de estos encontrados en EBSCOHOST, en la base de datos del Grupo Internacional para Lean Construction, del LCJ, entre otras. Las palabras claves que utilice fueron, *Lean*, *Toyota System*, *Lean Construction*, *Project Management*.

Cabe señalar que fue difícil encontrar bibliografía en español, ya que este método está presente en muy pocos

países de latino América, y en España apenas se está mostrando interés. Uno de los pocos artículos que se uso fue el documento realizado por Luis Felipe Pons, en el que se hizo una introducción a lo que es el sistema.

Los temas que quise destacar en el artículo los elegí tomando en cuenta los conceptos claves que definen el Sistema Lean Construction, como el liderazgo, la sustentabilidad, la situación actual y como se implementaría en una construcción.

Conclusiones

Con base a lo planteado en este artículo se puede concluir que el método *Lean Construction* (LC) tiene un potencial nato aplicable al área industrial de la construcción, siendo evidente cada vez más su auge. Es una situación global que las empresas de este sector busquen la factibilidad de su implementación por los beneficios que LC brinda.

Aunado a esto, se debe tener en cuenta, que en sectores de la construcción como lo es la edificación de vivienda en serie, se pueden obtener crecimientos económicos, aunado a una reducción considerable en el impacto ambiental, gracias a las técnicas de producción que tiene LC.

Los múltiples beneficios aportados por esta metodología en la industria de construcción, se proyectan más allá de esta área, ya que nos permite gozar de beneficios ecológicos, sociales y económicos. Un claro ejemplo positivo es su relación con la sustentabilidad, donde se observa el nexo existente entre las diversas esferas tanto ecológico, sociales y económicas que esta filosofía produce.

Como en todo sistema o metodología, su correcto funcionamiento requiere de las bases correctas y del compromiso que se tenga. Alrededor de este tema, se encuentra un sin fin de paradigmas sobre la construcción, marginando en cierto sentido a esta área con las diversas actividades económicas dentro de las cuales es aplicable el sistema *LC*. Es necesario cambiar la mentalidad que se tiene al respecto, ya que las evidencias son prueba fehaciente de los resultados que *LC* produce en el ámbito de la construcción.

Referencias

- Bertelsen, Sven. (2004, octubre 1). "*Lean Construction: where are we and how to proceed?*". Lean Construction Journal, 1, 1-24. 2015, abril 15, De LCJ Base de datos.
- Biton, Nelson, & Howell, Gregory. (2013, julio 21). "*The journey of Lean Construction theory: review and reinterpretation*". Proceedings IGLC, 8, 8. 2015, marzo 9, De IGLC Base de datos.
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción Gerencia de Economía y Financiamiento. 2013. "*Presentación ejecutiva del Entorno Actual y Futura de la Industria de la Construcción en México*". México. URL: http://www.cmic.org/cmic/economiaestadistica/2013/presentacion_ejecutiva_construccion_julio.pdf. Consultado abril 2015.
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. 2015. "*Valor de producción de la obra realizada por las empresas constructoras; por tipo específico de obra, según localización geográfica de las obras*". México. URL: http://www.cmic.org/cmic/economiaestadistica/2014/VBP_2013.pdf. Consultado abril 2015.
- Do Amaral, Tatiana Gondim, Monteiro Celestino Pedro Henrique, Alves Fernandes José Henrique, Gomes Brito Mário Henrique, & Batista Ferreira Murillo (2012). "*Presence of lean construction principles in the civil construction market in the state of Goiás*." Proc., 20th Annual Conf. of the Int. Group for Lean Construction, IGLC 20, San Diego.
- Ibarra Gómez, Luis Iván. (2011, junio). "*Lean Construction*". Tesis UNAM, 1, 52. 2015, marzo 9, De PTOLOMEO Base de datos.
- Koskela Lauri. "*Application of the New Production Theory to Construction*." Technical Report#72, Center for Integrated Facilities Engineering, Stanford University. May, 1992.
- Kracik, John F. (1988). "*Triumph of the lean production system*". Sloan Management Review 30 (1): 41-52.
- Nahmens, Isabelina, & Ikuma, Laura H. (2012, junio). "*Effects of Lean Construction on Sustainability of Modular Homebuilding*". Journal of architectural engineering © asce, 10, 10. 2015, marzo 10, de EBSCOHOST Base de datos.
- Mostafa Sherif, Chileshe Nicholas, & Zuo Jian. (2014, junio). "*Enhancing Australian housing affordability: off-site manufacturing supply chain strategies*". Proceedings IGLC-, 1, 14. 2015, marzo 8, De IGLC Base de datos.
- Pons Achell Juan Felipe. (2014, marzo). "*Introducción a Lean Construction*". Fundación Laboral de la Construcción, 1, 74. 2015, marzo 5.
- Shang Gao. (2014, junio). "*Toyota way lean leadership: some preliminary findings from the Chinese construction industry*". Proceedings IGLC, 1, 12. 2015, marzo 10, De IGLC Base de datos.

Evaluación del congestionamiento vehicular en intersecciones viales

Nubia Paola Rodríguez Rucobo¹, Dr. José Osiris Vidaña², Mtro. Alberto Rodríguez Esparza²

¹Estudiante de Ingeniería Civil en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

²Docente del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Resumen

El congestionamiento vehicular en avenidas es un problema a nivel mundial debido al desarrollo económico y social que modifica la infraestructura y aumenta el flujo vehicular. Con la evaluación de capacidad vial, análisis de factores que ocasionan el congestionamiento por el conductor y la geometría de las vialidades pueden proponerse soluciones a esta problemática y aumentar su nivel de servicio. En el presente documento se abordan casos de propuesta de diseño geométrico de glorietas en intersecciones viales, el modelo de vuelta indirecta en U, cambio de dirección del sentido de carril y corredores no convencionales.

Palabras Claves: congestionamiento, vueltas en U, nivel de servicio.

Introducción

El congestionamiento vial es un problema que ocasiona dificultades en los sistemas de transporte en diversas ciudades de todo el mundo, los primeros puestos en congestionamiento vial son ocupados por ciudades como Los Ángeles, San Francisco y Nueva York en Estados Unidos así como Bruselas, Milán y París en Europa debido a que la cantidad de vehículos que circula por sus vialidades, (volumen de tránsito) ha aumentado ocasionando el problema del congestionamiento (INRIX, 2014).

El aumento del volumen de tránsito, se debe a que la población resuelve su necesidad de trasladarse para realizar sus actividades diarias, así como trasladar de la

misma manera los productos que consume y produce (Franco, 2008). Cabe mencionar que así como los usuarios se ven beneficiados al resolver sus problemas de traslado, también causa un impacto negativo a la sociedad, trayendo consigo la congestión vehicular e impactos como el ruido, invasión de la tranquilidad y la contaminación ambiental, de la cual el tránsito vehicular es la principal fuente de emisiones contaminantes. Estos problemas son resultado de las limitaciones que tiene la infraestructura vial para atender el crecimiento de viajes que demanda la población. Por cuestiones de planeación y crecimiento poblacional no previsto, los

espacios para alojar la infraestructura están limitados y por lo tanto se imposibilita el crecimiento y adecuación la infraestructura necesaria para atender la creciente demanda, lo que genera que se presenten problemas de congestión vial en las redes urbanas.

El diseño de vialidades y la operación de los vehículos en ellas se basan en los principios de la ingeniería de tránsito, la cual maneja factores que deben ser analizados para poder desarrollar los sistemas de transporte adecuadamente. Estos factores son la planeación, el diseño geométrico, la operación de tránsito y la administración (Sigua, 2008). De estos factores, los que se consideran más importantes para el congestionamiento vehicular son la planeación y la administración.

La falta de planificación vial es una causa de congestionamiento debido a que no se toman en cuenta los criterios que la componen como el desarrollo poblacional, diseño geométrico de vialidades, aforos y monitoreos de rutas de los diferentes modos de transporte. Debido a la falta de planificación vial, diversas ciudades no han podido anticipar los cambios sociales, económicos, espaciales y ambientales que han surgido, esto ocasiona una crisis de movilidad urbana e insuficiencia de servicios. Es por eso que se deben realizar análisis urbanos más rigurosos, apegados a estricto seguimiento de los planes urbanos. (Bazant, 2009). La falta de planificación se puede reconocer en ciudades latinoamericanas con un concepto denominado “urbanismo sin ciudad” en el que existe un divorcio entre las propuestas

en la planificación y las realidades en la operación de la vialidad y entre los impactos que se generan y sus soluciones debido a causas sociales, económicas, ambientales y urbanas (Chaparro, 2009). La planeación urbana y la planeación de vialidades se deben comenzar a considerar como una unidad dependiente para mitigar el conflicto de la congestión vehicular.

Dentro de los factores de desarrollo de sistemas de transporte se encuentra la administración y en este factor se tiene el inadecuado diseño o mantenimiento de la vialidad. Esto ocurre en diversas vialidades en las que es frecuente la falta de demarcación de los carriles de circulación, inesperados cambios en el número de carriles, la ubicación de paraderos de los autobuses que estropean la fluidez del tránsito, el mal estado del pavimento y la presencia de baches crecientes, todos estos factores generan restricciones de capacidad en las vialidades y aumenta la congestión vehicular (Thompson y Bull 2002).

El congestionamiento vial se presenta cuando los automóviles no pueden circular con la velocidad adecuada en la vialidad para la que fue diseñada. El manual de capacidad de carreteras describe tres factores importantes que influyen en la velocidad de los vehículos y el nivel de servicio en vialidades urbanas como el medio ambiente, la interacción de los vehículos y el control de tránsito (TRB, 2000).

De los factores que influyen en la velocidad se abordará el del medio ambiente ya que en éste se involucra el estado de ánimo del conductor en relación

con la interacción de vehículos y control de tránsito (AASHTO, 2010). Es importante tomar en cuenta que el congestionamiento vial afecta el estado de ánimo del conductor, un ejemplo muy común se presenta en las hora pico especialmente por la mañana y ciertamente es una situación que no se puede evitar, quizá el conductor pudiera anticiparse a considerar incluir más tiempo en sus rutas diarias, sin embargo esta solución consume el tiempo que el residente pudo haber utilizado en casa para dormir, ejercitarse o realizar cualquier actividad de su rutina diaria (Wu, et. al, 2012). Por otro lado, a los residentes de una ciudad que por alguna u otra razón no pueden anticiparse al congestionamiento y deben circular por las avenidas en la hora pico, se adentran a un entorno de tránsito vehicular donde los conductores experimentan estrés, enojo, urgencia por llegar en corto tiempo a su lugar de destino (Tanyel, et. al, 2013). Según Thompson y Bull en ciudades como Lima, Perú los

automovilistas tratan de ahorrarse segundos de tiempo de viaje al interponerse en las intersecciones para poder dar una vuelta izquierda, bloqueándolas y generando para los otros usuarios contratiempos mayores, afectando el desempeño del conductor en la vialidad por la que circula (Thompson & Bull, 2012).

Es muy importante tomar en cuenta que al problema de congestionamiento vehicular se le tiene que dar una solución para que esas intersecciones puedan operar de manera correcta, al tener un mejor plan de desarrollo y darle mantenimiento adecuado a las avenidas se puede obtener una mejoría en el sistema de transporte, esto ayudará al usuario tanto en el aspecto de conductor que transita la avenida, así como en su estado de ánimo al conducir el modo de transporte que utiliza y brindará un mejor servicio para poder realizar las actividades que requiere.

Medidas de mitigación para el congestionamiento vehicular

Como se mencionó anteriormente, existen diversos factores y causas (planeación, administración y velocidad) por las cuales una vialidad puede presentar congestionamiento. Se debe elaborar un análisis para identificar estos factores y de este modo diseñar propuestas de las opciones viables para solucionar o

disminuir el problema. A continuación se darán a conocer algunas propuestas de solución al problema del congestionamiento de intersecciones mencionando algunos estudios de caso donde fue implementada esa medida de mitigación así como los resultados que se obtuvieron.

Implementación de Glorietas

Investigaciones indican que las glorietas bien diseñadas, con uno o dos carriles, dependiendo de la condición que se requiera, pueden ser más seguras y eficientes que las intersecciones convencionales. Ciertamente, los accidentes viales y las lesiones que en ellos se presentan pueden reducirse en un 20% para un flujo vehicular de glorietas de dos carriles Figura 1 (Bared, 2003). Las especificaciones para el buen diseño de una glorietta están basadas en que los vehículos que entran a una glorietta deben ceder el paso de los vehículos que están circulando en el interior de la glorietta, los vehículos que circulan en el interior de la glorietta no están obligados a detenerse o ceder el paso ante los vehículos que intentan acceder a la

glorietta, no se permite estacionarse en el carril de la glorietta, los peatones no pueden realizar actividades dentro de la isla y todos los vehículos deben circular en un mismo sentido (Díaz, 2009). Las especificaciones anteriores son las que brindan la ventaja para el control del congestionamiento vehicular a su vez también proporcionan un flujo libre para uno de los sentidos que puede ayudar a movilizar el flujo de la vialidad. El análisis de glorietas en ciudades de Croacia muestran que las intersecciones clásicas han sido reemplazadas exitosamente con la implementación de glorietas aumentando la capacidad de las intersecciones y obteniendo un incremento en la seguridad vial (Šurdonja, et. al, 2003).

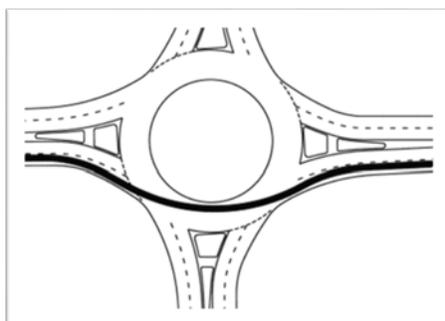


Figura 1. Representación del paso de vehículos en una glorietta de dos carriles (U.S. Department of Transportation, 2000)

Un estudio de caso en Maryland donde se observó el comportamiento de la operación de dos glorietas de dos carriles indicó que se puede reducir la problemática de puntos de conflicto por lo que se intentó utilizar como modelo por medio de simulación de intersecciones para

implementar las glorietas en el resto del país (Estados Unidos) y esto ayude con la disminución de accidentes vehiculares. (Headrick, et. al, 2014).

Para poder considerar una glorietta como alternativa de control en una intersección, es necesario verificar que el

desempeño del flujo vehicular en ella sea mejor que cualquier otra alternativa como semaforización, contraflujo, vueltas en U entre otros. Los parámetros a seguir cuando se compara una glorieta con una intersección convencional u otro tipo de intersección deben ser que (1) la glorieta siempre debe asegurar una capacidad mayor (tasa de flujo máxima en la que los vehículos pueden entrar a la glorieta dado un periodo de tiempo bajo las condiciones de tráfico que prevalecen) y retrasos de viaje menores. Además de operar con el

mismo volumen de tránsito y limitaciones de derecho de vía, (2) la glorieta debe operar sin sobrepasar su capacidad ni el factor horario de máxima demanda. Finalmente (3) la glorieta que opera a la capacidad a la que fue diseñada debe producir retrasos menores que una intersección señalizada operando con el mismo volumen de tránsito y limitaciones de derecho de vía. De acuerdo a estas características se puede definir si es conveniente realizar o no la implementación de una glorieta (TRB, 2000).

Modelo de Vuelta en U

Las vueltas en U han sido utilizadas convencionalmente para reducir el retraso y los conflictos de congestionamiento en las intersecciones con vuelta izquierda. Las vueltas en U son proporcionadas generalmente para el carril de vuelta izquierda en una intersección, los conductores de vuelta izquierda en U deben ceder el paso a los conductores que van en el sentido contrario y esperar su turno para realizar la vuelta en U. El radio de giro juega un papel importante para la utilización adecuada de las vueltas sobre todo para avenidas de cuatro carriles, en algunos casos es necesario realizar mejoras al pavimento para que en la operación, el vehículo que cuenta con espacio reducido para realizar la vuelta, no demore el tránsito de los vehículos en el sentido al que trata de incorporarse (Liu, et. al, 2012).

Se han realizado numerosos estudios que han evalúan la seguridad de las vueltas en U, esta vuelta ha sido implementada con

éxito por varios años en ciudades de Estados Unidos, especialmente en Michigan como alternativa de vueltas convencionales a la izquierda ya que obtuvieron como resultado la disminución de accidentes vehiculares. (Azizi & Sheikholeslami, 2013). En la Ciudad de Tampa Bay se utilizó un modelo de simulación para vueltas en U en intersecciones no semaforizadas con datos obtenidos de 13 intersecciones, el modelo de simulación es capaz de analizar la capacidad vial que tendrá una avenida, la recolección de información se basó en las condiciones de tránsito, condiciones geométricas y comportamiento del conductor, de este modo este sistema es reconocido la seguridad y los beneficios operacionales de las avenidas por la utilización de vueltas en U ya que alivian la congestión vehicular en intersecciones señalizadas.

Para la implementación de esta medida de solución se requiere que la

intersección cuente con las siguientes condiciones: (1) El sitio de estudio debe estar localizado en una avenida de 4 carriles o seis carriles con dos o tres carriles en direcciones opuestas, (2) solamente debe haber una vuelta en U en la apertura al centro de la vialidad, (3) El volumen de la intersección deberá ser alto para poder registrar las observaciones posibles durante cierto periodo de tiempo y (4) la distancia de la señalización de la intersección a la intersección debe ser larga para evitar impactos por señalizaciones, en el caso de estudio de Tampa se utilizaron 6 intersecciones con 4 carriles, dos por cada sentido tomando las medidas de datos geométricos correspondientes (Liu, et. al, 2012).

Según Liu para un diseño satisfactorio de vueltas en U, el ancho del carril debe ser lo suficientemente grande para permitir que el vehículo gire de un carril exclusivo en vuelta izquierda en U hacia el hombro exterior del siguiente carril. También se debe implementar la reducción de velocidad en las vueltas izquierdas para que el vehículo opere con mayor seguridad y así se eviten accidentes. Para este caso, la utilización de un modelo de simulación ayudará a conocer, de acuerdo a los parámetros establecidos, cómo será la operación de la vialidad cuando se le agrega una bahía, permitiendo que el tránsito se desarrolle con un flujo continuo para los

conductores de los carriles que no son utilizados en vueltas en U, la limitación de este estudio radica en que no se pueden obtener los impactos para vehículos pesados con esta simulación (Liu, et. al, 2012).

Estudios en Teherán arrojaron que de acuerdo al análisis para convertir las vueltas izquierdas a vueltas en U no fueron del todo favorables. Por medio de la modelación se obtuvieron resultados que mostraron que la geometría de las vueltas en U comprometía la seguridad e incrementaban los accidentes en un 13.22%. Con el volumen de tránsito adecuado (diseñado para el caso correspondiente y las especificaciones geométricas) la implementación de las vueltas en U puede tornarse segura. Si bien en este caso en particular los resultados no fueron los esperados, se obtuvieron los resultados que denotan las modificaciones que deben realizarse en las características geométricas, el derecho de vía y el radio de giro para implementar la vuelta deseada con éxito asegurando la reducción de accidentes y no el incremento de ellos. De hecho la Organización de transporte y Tránsito de Teherán, reconoció la seguridad y los beneficios operacionales de las avenidas por la utilización de vueltas en U ya que alivian la congestión vehicular en intersecciones señalizadas (Azizi & Sheikholeslami, 2013).

Contraflujo

El contraflujo es una estrategia utilizada para cambiar el sentido de los carriles en la

que se encuentran saturados hacia la dirección opuesta para incrementar la

capacidad de las calles que conforman las intersecciones. Puede ser utilizado para resolver problemas de congestión recurrente (que ocurre varias veces en poco tiempo) y también de no recurrente (que ocurre ocasionalmente) Para implementar el contraflujo se requieren de dos aspectos fundamentales: (1) El contraflujo óptimo de configuración de línea (OCLCP) que determina a cuales líneas de la calle se le puede cambiar el sentido y el (2) contraflujo óptimo de programación de línea (OCLCP) se enfoca más hacia los tiempos y la duración de operación (Qiang , Hooi, & Ruey , 2008).

Como estudio de caso se tiene una intersección ubicada en el centro histórico de la ciudad de México. Para poder proponer una solución para el problema de la Ciudad de México, se creó una red de la zona de estudio, en primer lugar se propuso eliminar los obstáculos físicos de las vialidades, sin embargo por cuestiones políticas, sociales y económicas esta propuesta no llevó al mejoramiento de la circulación y se planteó la idea en la que incluso podía llegar a ser contraproducente cuando se tiene una red muy congestionada la distribución de tráfico entre sus vialidades puede tener buenos efectos en la congestión general de la red y es fácil de implementar (Lozano, et. al, 2003).

Como respuesta al fracaso de medias de eliminación de obstáculos físicos de las vialidades, se optó por plantear la vuelta inglesa como segunda propuesta, esta se basa en un concepto de “vuelta adelantada” y de “nodo de circulación continua” donde los vehículos que desean girar hacia la izquierda lo realizan antes de llegar al nodo y no en el mismo. De esta manera se garantiza que el nodo siempre se encuentra movilizándolo el flujo vehicular en ambas direcciones sin tener que detener por completo el flujo en alguna otra dirección para dar paso al de la otra. Como tercera propuesta el cambio de sentidos en la circulación, de acuerdo a un modelo de prueba para el flujo vehicular, con ello la vialidad presenta menos congestión y es evidentemente mejor que el escenario actual, además que a través de estudios de emisiones producidas por la congestión es posible que pueda reducirse el porcentaje de emisiones a un 33% (Lozano, 2003). De acuerdo a las propuestas establecidas los resultados arrojaron que evidentemente en ese caso el contraflujo fue una medida adecuada para el problema de congestión y puede ser utilizada como modelo en otros casos e vialidades que presenten una situación similar.

Implementación de Corredores no convencionales en intersecciones (USC)

Recientemente, se ha propuesto un diseño de intersecciones llamado “no convencional” para resolver problemas de

los movimientos de tránsito pesado cuando dan vueltas izquierdas. Este tipo de modelo no convencional consiste en emplear en

conjunto diferentes tipos de arreglos geométricos tales como la vuelta izquierda desplazada para cruce (XDL) cuya principal característica geométrica consiste en la eliminación de movimientos de giro a la izquierda de la intersección principal a un lugar señalado posteriormente, el diseño de cruce de media vuelta en U (MUT) donde se realiza la vuelta izquierda en U antes de llegar a la intersección cruzando por el centro de la bahía y el diseño de intersección de cruce medio (SSM) que es similar al MUT pero tiene una característica adicional en la que permite que las señales operen de forma independiente en dos direcciones debido a que contienen un descanso transversal en la intersección para el flujo de peatones.

El caso de estudio donde se implementaron estos arreglos fue en intersecciones semaforizadas ubicadas en Doha, Qatar, en este estudio de caso se puede observar que existen tres soluciones para mitigar el congestionamiento en Doha. Al utilizar modelo de simulación, se deben tomar en cuenta dos problemas importantes cuando se estudian los volúmenes de tránsito, el primero es la presencia de algunos volúmenes por vuelta en U lo cual es permitido en casi todas las intersecciones de Doha, el diseño de intersecciones USC

no permite la presencia de movimientos de vueltas en U y están excluidas del análisis. El segundo problema es la desigualdad de volúmenes que se encontraron de una avenida a otra, el volumen de una intersección no precede a la intersección siguiente (Esawey, et. al, 2010).

Para la realización de modelos de simulación de las avenidas en estudio, fue necesario elaborar las simulación para los diversos casos que se expusieron anteriormente, una vez que se elabora la simulación correspondiente, debe haber un análisis de la operación de avenidas antes y después para poder apreciar cualquier mejora en el sistema (Fowdur, et. al, 2012).

Se analizó un corredor convencional contra un corredor no convencional y los resultados que se obtuvieron en el corredor no convencional fueron mejores, por medio de mediciones de tiempo de retraso se llegó al resultado donde los corredores USC experimentan retrasos mucho menores con un porcentaje en horas de 19% así como una reducción de retraso en la hora pico de un 7% a 22%. Los resultados obtenidos indican un mejoramiento en la operación del corredor utilizando una configuración USC en comparación con una convencional (Esawey & Sayed, 2010).

Metodología

Al desarrollar el tema, se utilizó una estrategia de búsqueda para las referencias y fuentes bibliográficas necesarias partiendo desde la división de los puntos importantes que abarca en el tema de estudio; lo

primordial fue saber las causas y consecuencias del congestionamiento en avenidas tomando en cuenta como factor primario la gestión incorrecta de la planeación urbana además valorar que

existen ciudades en todo el mundo que sufren de problemas de congestión vial.

Como segunda cuestión se tomaron en cuenta las consecuencias que está causando la congestión vehicular que son económicas, sociales y de infraestructura y por último fue necesario encontrar estudios de casos donde pudiera mostrarse la problemática descrita en este documento.

Para encontrar información acerca de estudio de casos en el país, se recurrió a sitios especializados en el tránsito vehicular y asociaciones especializadas al transporte así como artículos relacionados con el

congestionamiento vehicular y estudios de caso de diversas ciudades del mundo. Se tuvo acceso a la página de internet de la American Society of Civil Engineers (ASCE), donde se localizaron los *journals* que podían ser utilizados para la investigación en curso: *Journal of Urban Planning and Development* y *Journal of Transportation Engineering*.

Las bases de datos utilizadas fueron EBSCOhost donde se encontraron todos los artículos utilizando las palabras claves correspondientes y Science Direct donde se localizaron principalmente artículos de estudios de caso en el mundo.

Conclusión

De acuerdo a los temas abordados, se afirma que la implementación de avenidas en una ciudad conlleva al análisis de factores económicos, sociales y de infraestructura. Cuando se realiza un estudio para elaborar el diseño geométrico de una avenida se deben tomar en cuenta el crecimiento de la población en ese año y en años futuros, así como la tasa de crecimiento de adquisición de vehículos propios ya que eso propicia un aumento en el flujo vehicular de avenidas y es causante del congestión vial.

Existen diversas soluciones para elevar el nivel de servicio de avenidas y así mejorar el flujo en ellas, sin embargo no todas las soluciones propuestas podrían ser la respuesta a la problemática que se maneja, es por eso que se deben tomar en cuenta todos los factores que debe contener la elaboración de un proyecto geométrico y de acuerdo a casos de estudio similares y las características de la avenida a analizar, tomar la decisión que sea mejor. Es importante el análisis de congestión de avenidas para poder encontrar una solución a su infraestructura porque el problema trasciende hasta un ámbito personal (del conductor en su entorno) y del estado de ánimo del pasajero.

Cabe mencionar que si bien, todas las vialidades son diferentes entre sí, generalmente se pueden tomar como experiencia el éxito o fracaso de la implementación de las soluciones que se han tomado en otros países, sin embargo si no se toma en cuenta los factores de planeación y proyección de las vialidades antes de realizar el diseño geométrico, sería como volver a cometer los mismos errores de planeación y transporte volviendo a los paradigmas que siempre se han llevado a cabo.

Referencias

- American Association of Safety Highway and Transportation Officials. (2010). Highway Safety Manual.
- Azizi, L., & Sheikholeslami, A. (2013). Safety effect of U-Turn conversion in Theran: Empirical bayes observational before-and-after study crash prediction models. *Journal of Transportation Engineering*, 101-108.
- Bared, J. G., Hasson, P., Ranch, F. N., Kalla, H., Ferlis, R. A., & Griffith, M. S. (2003). Reducing Points of Conflict. *Public Roads*, 1.
- Bazant, J. S. (2010). Expansión urbana incontrolada y paradigmas de la planeación urbana. *Espacio abierto: cuaderno Venezolano de Sociología*, 473-503.
- Board, T. R. (2000). *Highway Capacity Manual*. Washington D.C. : The National Academy of Sciences.
- Chaparro, J. J. (2009). *PLANEACIÓN URBANA EN MÉXICO: UN ANÁLISIS CRÍTICO*. Concepcion, Chile.
- Diaz , L. V. (2009). Análisis vial de dos intersecciones sin semáforo en zona aledaña de nuevo Terrapuerto de Piura. *Responsorio institucional PIRHUA*, 1-108.
- Esawey, M. E., & Sayed, T. (2010). Unconventional USC interection corridors: evaluation of potential implementation in Doha, Qatar. *Advanced Transportation*, 38-54.
- Fowdur, S. C., & Rughooputh, S. (2012). Evaluation of congestion Relief Proposals in a Capital City. *Journal of Applied Mathematics*, 1-13.
- Franco, L. (2008). Aplicación de simulación de control de tráfico, una propuesta para la ciudad del Este. *Informática*, 75-82.
- Headrick, J., & Uddin, W. (2014). Traffic flow microsimulation for performance evaluation of roundabouts ans stop-controlled intersections at highway overpass. *Advaces in Transportation Studies an International Journal Section*, 7-18.
- INRIX . (2014, Seattle 25/04/2015). Retrieved from Informe Anual INRIX National Traffic Scorecard : <http://inrix.com/>
- Liu, P., Qu, X., Yu, H., Wang, W., & Cao, B. (2012). Developement of a VISSIM Simulation Model for U-Turns at Unsignalized Intersections. *Journal of Transportation Engineering*, 1333-1339.
- Lozano, A., Torres, V., & Antún, J. (2003). Tráfico Vehicular en zonas urbanas. *CIENCIAS* 70, 7.
- Qiang , M., Hooi, K. L., & Ruey , C. L. (2008). Microscopic Traffic Simulation Model-Based Optimization Approach for the Contraflow Lane Configuration Problem. *JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING*, 41-49.
- Sigua, R. G. (2008). *Fundamentals of Traffic Engineering*. Philippines: The university of the Philippines Press.
- Šurdonja, S., Deluka-Tibljaš, A., & Babić, S. (2003). OPTIMIZATION OF ROUNDABOUT DESIGN ELEMENTS. *Tehnicki vjesnik*, 533-539.
- Tanyel, S., Celik, K., Ozuysal, M., & Caliskanelli, P. S. (2013). Different aproaches to minimum delay prediction at single-lace traffic circles in Izmir, Turkey. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 274-285.
- Thompson, I., & Bull, A. (2012). La congestión del transito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales. *Revista de la CEPAL* 76, 109-121.
- Transportation, U. D. (2000). *Roundabouts: an informational guide*. Portland, Oregon: Kittleson & Associates Inc.
- Wu, Y.-J., Zhang, G., & Wang, Y. (2012). Link-Journey Speed Estimation for Urban Arterial Performance Measurement Usin Advance Loop Detector Data under Congested Conditions. *Journal of Transportation Engineering*, 1321-13

Análisis y Evaluación de Intersecciones Urbanas

Estefanía Miramontes García¹, Dr. José Osiris Vidaña Bencomo², Mtro. Alberto Rodríguez Esparza³.

¹Estudiante del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

^{2,3}Docente del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Resumen

Todo país tiene necesidad de una red vial para la movilidad urbana, debido a que el desarrollo de una ciudad está directamente relacionado con su infraestructura vial. Los países en desarrollo se caracterizan por que su infraestructura vial es frágil y desequilibrada, por consiguiente se debe priorizar el desarrollo de la infraestructura vial. Dentro de esta infraestructura vial, las intersecciones forman parte primordial del desarrollo del tránsito, presentando puntos de conflicto que necesitan ser mitigados para una mejora en el servicio que prestan. Esta revisión tiene como objetivo conocer estudios y métodos realizados para el análisis y mejoramiento de intersecciones.

Palabras clave: red vial urbana, intersección urbana, puntos de conflicto, semaforización

Introducción

Una red vial es uno de los patrimonios más valiosos de cualquier país, ya que en ella se da el desarrollo social y económico. Los caminos urbanos, mejor conocidos como vialidades urbanas o calles, son la estructura de toda red vial de una ciudad (Cal y Mayor, 1994). La interacción entre las calles en la estructuración de una red vial urbana da origen a las intersecciones o cruces de caminos, cuyo objetivo es brindar comodidad al usuario y a su vez aumentar la eficiencia de los movimientos direccionales que los vehículos realizan en ella (AASHTO, 2001). Dichas intersecciones son de gran importancia para la alimentación de una red vial urbana y para su capacidad.

El análisis y la evaluación de una intersección pueden ayudar al mejoramiento de su capacidad vial. En la evaluación de intersecciones es necesario tomar en consideración ciertos criterios para la correcta funcionalidad del cruce de calles. Tales criterios tienen base en el volumen vehicular, retrasos generados por los controladores de tránsito y la saturación de flujo vehicular. El conjunto de lo antes mencionado confluye en el nivel de servicio. El concepto de nivel de servicio fue introducido en el manual de capacidad de carreteras de 1965 y la actual definición de nivel de servicio en el manual de capacidad de carreteras del 2010 es: una

medida de calidad que describe las condiciones de funcionamiento dentro de un flujo de tránsito, en general, en términos de medidas de servicios tales como la velocidad y el tiempo de viaje, la libertad de maniobra, las interrupciones de tráfico, el

confort y la comodidad (Transportation Research Board, 2010).

Conociendo el nivel de servicio que la infraestructura de una intersección provee al usuario, se determina si ésta requiere alguna acción correctiva para mejorar su funcionalidad.

Puntos de conflicto

Una intersección es definida como la unión o cruce de diferentes movimientos direccionales vehiculares en un mismo nivel (AASHTO, 2001). El cruce de movimientos direccionales a nivel se ve afectado por una gran cantidad de puntos de conflicto, los cuales son puntos potenciales de accidentes dada su relación con la intensidad de tránsito en una intersección.

Los puntos de conflicto que se pueden presentar en una intersección son tres, los cuales se presentan en la figura 1. El primero es el punto de divergencia

(figura 1a), en el cual una trayectoria común se separa para tomar distintas direcciones; mientras que el punto de convergencia (figura 1b), al contrario que el de divergencia, dos o más trayectorias se unen para formar una en común. Por último, el tercer punto de conflicto que se puede presentar en una intersección es el punto de cruce (figura 1c). Éste punto es donde dos trayectorias diferentes ocupan temporalmente el mismo lugar, en tiempo y espacio.

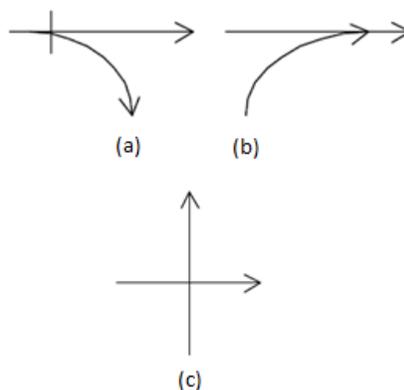


Figura 1 (a) Punto de divergencia, (b) punto de convergencia, (c) punto de cruce.

En la figura 2 se muestra el conjunto de puntos de conflicto que se presentan en una intersección con una geometría común en la red vial urbana.

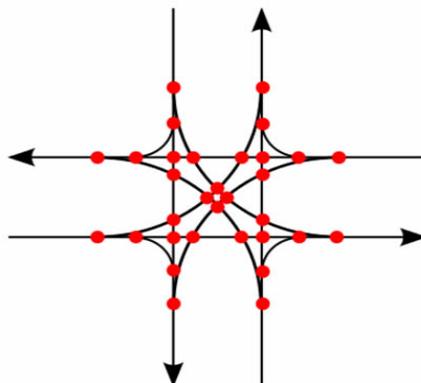


Figura 2 Puntos de conflicto en una intersección con geometría tipo cruz. (Alvarez, 2014)

Tipos de intersecciones: Semaforizadas y no semaforizadas

Uno de los factores que afecta directamente la incidencia de puntos de conflicto es la maniobra del conductor, ya que éste puede generar rutas no previstas en los movimientos direccionales. Las rutas no previstas son el resultado de maniobras inesperadas que los vehículos realizan, las cuales se traducen como cambios de carril o vueltas no planeadas a la izquierda o derecha en carriles que solo van de frente. En intersecciones no semaforizadas (figura 3a) estas rutas se presentan comúnmente, dado que cada conductor debe encontrar el momento preciso y seguro para ejecutar el movimiento deseado (Depiante, 2011). Los cruces sin señales de control de tránsito, mejor conocidas como semáforos; dependen de la percepción de tiempo y espacio del usuario, ya que estos deben tomar una decisión con respecto a cuándo hacer el movimiento (tiempo) y decidir si es seguro hacerlo (espacio).

El conjunto de las rutas no previstas y la percepción del usuario resulta en zonas potenciales de puntos de conflicto con otros movimientos direccionales ampliamente distribuidas, lo cual afecta la probabilidad de que ocurran conflictos graves (Alhajyaseen, 2013)

Se considera que reduciendo los puntos de conflicto o separándolos, es una de las mejores maneras para optimizar la seguridad en una intersección (Lu, 2013). Para la mitigación y solución de las diferentes controversias que se pueden presentar en un cruce direccional, se opta por la semaforización (figura 3b). Las intersecciones semaforizadas separan con respecto al tiempo los movimientos de cruce por medio de ciclos de espera para la luz verde (Ding, 2010).

Yong-Gang Wang en su investigación de seguridad de intersecciones

en Harbin, China, comparó los accidentes ocurridos en intersecciones semaforizadas y no semaforizadas. Menciona que el semáforo tiene una mayor importancia que otras señales de tránsito, ya que ésta organiza el flujo de tránsito y mejora las

condiciones de seguridad en una intersección. Con los resultados de su análisis indica que con la semaforización y el monitoreo de tránsito se puede reducir el porcentaje de incidencia de accidentes en una intersección (Wang, 2011).



(a)



(b)

3 Tipo de intersecciones urbanas (a) intersección no semaforizada, (b) intersección semaforizada

Semaforización

A lo largo del tiempo se ha encontrado en la semaforización una solución viable para la funcionalidad y eficiencia de un cruce. Investigaciones de intersecciones semaforizadas han llevado a la determinación de demoras, longitud de línea, dispersión de pelotón, disipación de línea y características del conductor y del vehículo, todo esto bajo condiciones de flujo de tránsito homogéneas (Asaithambi, 2008).

El sistema convencional de control de tráfico semaforizado con tiempos fijos es uno de los más populares y viejos sistemas en el mundo. El controlador de este tipo de

semáforos repite tiempos de fases preestablecidos derivados de análisis de patrones de tránsito históricos. Con el desarrollo de la tecnología, se han desarrollado métodos de programación de semáforos para ajustar los tiempos de señal para las diferentes fases conforme a los datos de tránsito en tiempo real. Algunos de estos métodos son, el control accionado por vehículo, el control semi-accionado, el control de onda de luz verde, entre otros (Pranevicius, 2011). Uno de los métodos de control accionado por vehículo que se ha desarrollado es el de semáforos inteligentes. Estos semáforos, a diferencia de los de tiempo fijo, tienen la particularidad de

variar su tiempo de ciclo de acuerdo al flujo de automóviles que exista en las calles bajo su dominio (Moras, 2009).

Con la implementación de estos programas en tiempo real, se han desarrollado análisis para el mejoramiento de flujo en una intersección mediante nuevos sistemas de semaforización. Tal es el caso de la evaluación realizada por Moras, donde él y su equipo de trabajo analizaron la posibilidad de utilizar semáforos inteligentes para mejorar el desempeño del sistema que se presentaba en Orizaba, Veracruz, México. Dicho análisis se realizó por medio de una simulación en el programa Stat:fit, incluido en las herramientas de ProModel. El programa es una plataforma para desarrollar simulaciones en tiempo real y encontrar valores óptimos para los parámetros simulados. De este modo se creó un modelo para evaluar el sistema de semáforos en Orizaba, para lo cual se introdujeron en el programa los datos de flujo vehicular en horarios de máxima demanda, así como los datos de flujo de las demás horas. De acuerdo a la configuración de la zona donde se implementaría el uso de semáforos inteligentes, con la ayuda del modelo lograron proponer diferentes alternativas de solución, las cuales combinaban el uso de semáforos de tiempo fijo e inteligentes (Moras, 2009).

La semaforización depende de varios factores, incluyendo el flujo vehicular, la seguridad de los peatones, puntos de conflicto, beneficios económicos, entre otros. Las señales de tránsito deben ser diseñadas correctamente para evitar retrasos innecesarios y optimizar el

funcionamiento de la intersección (Boumediene, 2009). Varios investigadores como Akgüngör, Singh y Hellinga; han llegado a la conclusión de que los retrasos generados en intersecciones semaforizadas varían de acuerdo al volumen horario durante un día. Con base en lo anterior se proponen como solución la implementación de diferentes ciclos a lo largo del día según el volumen vehicular lo demande. Dicha variación de ciclos puede ser programada manualmente según los volúmenes horarios de máxima demanda, o bien pueden utilizarse los ya mencionados semáforos inteligentes. (Akgüngör, 2007), (Singh, 2009) y (Hellinga, 2008).

Según el Manual de capacidad para las carreteras, HCM (Transportation Research Board, 2000); el mejoramiento de las señales de tránsito puede incrementar la capacidad de una intersección. Dicho mejoramiento se puede alcanzar por medio de cambios en las fases de los semáforos y un control de tránsito coordinado.

Dentro del contexto de mejoramiento de fases en los semáforos, uno de los enfoques más extendidos para el manejo de intersecciones semaforizadas es el de la lógica difusa (Fuzzy Logic). Niittymäki y Pursula simularon una intersección semaforizada aislada empleando Lógica Difusa. El controlador difuso trabajaba en dos niveles. El nivel superior identificaba las condiciones de tránsito y el de nivel inferior definía el ciclo de luz verde. Se comprobó que el controlador difuso redujo los retrasos y paradas cuando el volumen de tránsito era grande (Pranevicius, 2011). Así mismo, estudios han comprobado que el hacer a los

vehículos transitar por intersecciones de forma rápida y segura, ayudaría

significativamente al mejoramiento de la capacidad vial en ellas (Akgüngör, 2007).

Métodos de análisis y evaluación de intersecciones

Para la implementación de mejoras en el nivel de servicio de una intersección, es esencial realizar un análisis y evaluación de ella. Para desarrollarlo es necesario recolectar información, la cual en el análisis de intersecciones es principalmente con relación a su geometría y los conflictos que ésta presenta. Los puntos de conflicto en una intersección, tradicionalmente se deducen manualmente con ayuda de una fotografía, o diagrama de la intersección que muestra su configuración. Pan, consideraba ese método molesto, por lo que desarrolló un modelo computacional que identificaba de manera automática el total de puntos de conflicto en una intersección con base en las características de ésta. Dichas características debían ser: la geometría de la intersección, el control de tránsito en ella y la configuración de los carriles. Posteriormente, incorporó otra característica que consistía en las rutas no planeadas que se pudieran generar en cada carril, tales rutas serían las vueltas a la derecha o izquierda en un carril que también fuera de frente. De este modo el programa identifica de manera automática los diferentes puntos de conflicto, proporcionando esta información esencial para el estudio de la intersección y por lo tanto para su evaluación (Pan, 2012). Posteriormente, se procede a complementar la recolección de la información con respecto a las características del flujo, la

capacidad y al congestionamiento de la intersección.

Con la información recolectada se procede a desarrollar el análisis correspondiente. El método tradicional de evaluación de intersecciones con o sin semáforos es mediante la utilización de manuales estandarizados. El manual de capacidad para carreteras (HCM) contiene parámetros generales para la evaluación de intersecciones. Los capítulos de intersecciones semaforizadas y no semaforizadas en el HCM contienen la información necesaria para la comprensión y recopilación de los datos requeridos para el análisis del nivel de servicio. Dicho análisis toma en consideración la saturación de flujo vial, presencia de camiones de carga pesada, estacionamientos en la calzada, los movimientos peatonales, ciclistas, los ciclos de los semáforos y todos los factores que pudieran afectar la funcionalidad de una intersección. Estos factores, y los parámetros antes mencionados, son utilizados alrededor del mundo, por lo que la metodología presentada en el manual HCM resulta un método viable y seguro para la evaluación de capacidad, saturación y del nivel de servicio de una intersección.

Otros métodos que se han desarrollado con base en el método tradicional del manual HCM, son métodos computarizados con base en algoritmos,

tales como el método Autómata Celular (AC). Ding-Wei Huang presentó un modelo AC para el análisis de patrones en una intersección tipo “T” como se muestra en la figura 4. Vehículos de tres de los carriles se mueven a través de la intersección, los cuales están señalados como 1, 2, 3; vehículos en los otros tres carriles se mueven fuera de la intersección, los señalados como 1', 2', 3'. La dinámica básica es descrita por el proceso de exclusión asimétrico simple (Asymmetric Simple Exclusion Processes, ASE). Cada partícula avanza a la siguiente celda mientras una celda vacía esté disponible. El sistema no es cerrado, existen seis límites abiertos marcados como las celdas sombreadas en la figura 4. Las partículas se pueden mover dentro y fuera del sistema a través de esos límites. Tres de los límites introducen nuevas partículas de manera

aleatoria, las cuales son especificadas por las tasas $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$; mientras que en los otros 3 límites las partículas son removidas de igual manera, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$. Huang desarrolló modelaciones para una intersección no semaforizada y también para una semaforizada asignando volúmenes de tránsito aleatorio, haciendo iteraciones en el modelo computarizado y a la vez modificando sus rutas (vueltas) en la intersección para visualizar el comportamiento de las partículas (vehículos) para determinar la congestión en la intersección (Huang, 2009). Los resultados que se obtienen empleando el método AC muestran el comportamiento del tránsito en la intersección a analizar, lo cual ayuda a la búsqueda de una solución o mejora para que el flujo vehicular transite con mayor eficiencia en la intersección.

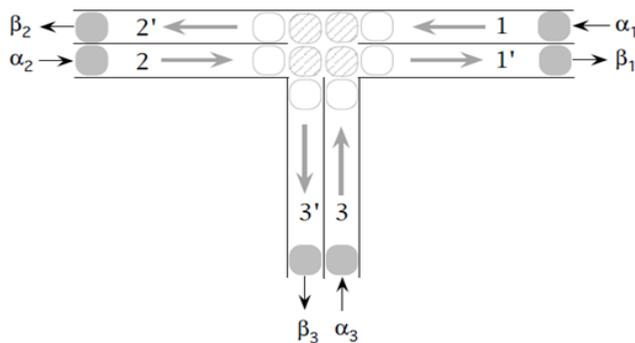


Figura 4 Configuración de una intersección tipo T. (Huang, 2009)

Así mismo, otra alternativa de análisis que emplea métodos computarizados para la evaluación de intersecciones urbanas es la simulación. Este método consiste en la utilización de un software para modelar las condiciones

actuales de un cruce, experimentar con los datos existentes y plantear soluciones necesarias en la intersección evaluada. Archer y Young evaluaron una intersección mediante el método de simulación utilizando el software VISSIM, el cual

trabaja con base en los modelos psychophysical car-following de Wiedemann para determinar la reacción del conductor, y el modelo rule-based de Sparmann, para los cambios de carril. Archer y Young recopilaron los datos de entrada para la simulación directamente de campo, tales como los ciclos existentes en los semáforos, los volúmenes de tránsito en el cruce y su composición en vehículos ligeros y pesados, los volúmenes de cada movimiento direccional, la velocidad promedio y el número de usuarios que se pasaban la luz roja. Una vez obtenidos los datos simularon la intersección en condiciones actuales y pudieron analizar lo que ocurría en ella. Después de su análisis propusieron varias medidas de mejoramiento, las cuales fueron modeladas para observar el comportamiento de la intersección. Dentro de las medidas de mejoramiento implementaron un algoritmo para el semáforo actuado. El algoritmo consideraba las zonas de dilema (zonas donde el conductor decide si seguir, o no, mientras se encuentra la luz ámbar) y los

vehículos en ella. Si un vehículo se encuentra en la zona de dilema un segundo antes de que se acabara el ámbar, el algoritmo le da tiempo extra de ámbar para evitar que pasen en luz roja, de igual manera funciona para el rojo total. Bajo el mismo concepto se aplicó ahora para los vehículos pesados, si estos se encuentran en la zona de dilema durante los últimos segundos de la luz verde, el algoritmo extiende la fase verde para que alcancen a pasar. Así también si se genera una cola de espera en el semáforo, el algoritmo detecta la longitud de cola de vehículos y enciende la fase verde. Los resultados indicaron que la extensión de la luz ámbar proporciona el mayor efecto en términos de reducción de violaciones de luz roja, pero desde la perspectiva de desempeño de tránsito extender el ámbar es ineficiente (Archer, 2010). De esta manera la simulación ayuda a la obtención de beneficios sustentables para el mejoramiento de la operación de una intersección. Esto con base en lo visto dentro del análisis.

Metodología

La metodología que se siguió para la recopilación de información para este documento se encuentra expresada de la siguiente manera. Se buscó información en libros, revistas (journals), archivos y

manuales con relación al área de ingeniería de transporte e ingeniería de tránsito dentro del sistema de bibliotecas de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y base de datos como EBSCOHOST.

Conclusión

El análisis y la evaluación de intersecciones es un proceso de gran importancia para la movilidad urbana, ya que si una intersección no cumple con su funcionalidad toda la red

vial se ve afectada. Estudios realizados a lo largo del mundo, en China, India, Lituania, Estados Unidos y México, reflejan la necesidad de mejoramiento urbano por medio del nivel de servicio de las intersecciones.

Los autores de los trabajos revisados aseguran la optimización de intersecciones por medio de mejoras en las señales de tránsito, disminución de demoras y la mitigación de puntos de conflicto. De este modo se considera que si individualmente cada uno de los métodos antes mencionados obtuvo resultados benéficos para el mejoramiento de intersecciones, la implementación en conjunto de ellos guiará a un mejor análisis y evaluación. Esto porque se podrán obtener los diferentes enfoques, según el método utilizado, y así determinar una solución global que beneficie en parte a todos los resultados. Con esto se logrará finalmente obtener una solución óptima para el mejoramiento de una intersección urbana, para que así ésta cumpla con su objetivo de la mejor manera.

Referencias

- AASHTO. (2001). Chapter 9. Intersections. In AASHTO, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* (pp. 559-745). Washington, D.C.: AASHTO.
- Adeleke, O. O. (2013). Determination of capacity at traffic warden controlled intersection using fixed-time signalised intersection capacity model. *International Journal of Engineering*, 33-36.
- Akgüngör, A. P. (2007). A New Delay Parameter Depent on Variable Analysis Periods at Signalized Intersections. Part I: Model Development. *Transport*, 31-36.
- Alhajyaseen, W. A. (2013). Stochastic approach for modeling the effects of intersection geometry on turning vehicle paths. *Transportation Research: Part C*, 179-192.
- Alvarez, F. (2014, Julio 16). ¿Cómo cruzar una ruta y no perder la vida en el intento? Cordoba, Alta Gracia, Argentina.
- Archer, J. &. (2010). Signal Treatments to Reduce the Likelihood of Heavy Vehicle Crashes at Intersections: Microsimulation Modeling Approach. *JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING © ASCE*, 632-639.
- Asaithambi, G. &. (2008). Evaluation of Left Turn Channelization at a Signalized Intersection Under Heterogeneous Traffic Conditions. *Transport*, 221-229.
- Boumediene, A. B. (2009). Saturation Flow versus Green Time at Two-Stage Signal Controlled Intersections. *Transport*, 288-295.
- Cal y Mayor, R. &. (1994). *Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones*. México, D.F.: Alfaomega.
- Depiante, V. &. (2011). *Capacidad en Intersecciones No SemafORIZADAS de Tres Ramas*. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.
- Díaz, M. d. (2002). *Influencia de la Geometría en la Determinación de los Puntos de Conflicto en una Intersección de Viales*. Santander, España: XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica.
- Ding, Z. J. (2010). Traffic Flow at a Signal Controlled T-Shaped Intersection. *International Journal of Modern Physics C*, 443-455.
- Hellinga, B. &. (2008). Signalized Intersection Analysis and Design: Implications of Day-to-Day Variability in Peak-Hour Volumes on Delay. *Journal of Transportation Engineering*, 307-318.
- Huang, D.-W. (2009). Complete Traffic Patterns Arround a T-Shaped Intersection. *International Journal of Modern Physics C*, 189-204.
- Lu, J. J. (2013). A Programmable Calculation Procedure for Number of Traffic Conflict Points at Highway Intersections. *Journal of Advanced Transportation*, 692-703.
- Moras, C. G. (2009). Evaluacion de un Sistema Inteligente de SemafORIZACION Mediante Simulacion para la Ciudad de Orizaba, Veracruz. *Revista de la Ingeniería Industrial*, 1-23.
- Pan, F. Z. (2012). A Method for Determining the Number of Traffic Conflict Points Between Vehicles at Major–Minor Highway Intersections. *Traffic Injury Prevention*, 424–433.
- Pranevicius, H. &. (2011). Knowledge Based Traffic Signal Control Model for Signalized Intersection. *Transport*, 263-267.
- Singh, D. &. (2009). Stochastic optimization method for signalized traffic signal systems. *International Journal of Knowledge Based Intelligent Engineering Systems*, 71-77.
- Transportation Research Board. (2000). *Highway Capacity Manual*. Washington, DC: TRB.
- Transportation Research Board. (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.: TRB.
- Wang, Y. G. (2011). Integrating before and after crash features into measuring the effectiveness of intersection safety improvement project in Harbin. *Transport*, 111-120.
- Wu, Q. S. (2005). Study of traffic flow at an unsignalized T-shaped intersection by cellular automata model. *The European Physical Journal B*, 265-269

Retos sobre la problemática del abastecimiento de agua potable a nivel mundial, nacional y en Ciudad Juárez

Paola Arely Moreno Pulido¹, Dr. Oscar Fidencio Ibáñez Hernández², Mtro. Alberto Rodríguez Esparza³.

¹Estudiante del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

^{2,3}Docente del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Resumen

Se aborda el deficiente suministro de agua potable en diferentes ámbitos; la manera en que este problema persiste como un reto prioritario de la ingeniería a nivel mundial cómo se encuentra la cobertura del agua potable en México, y los problemas que se derivan al no tener un acceso digno al mismo, finalmente se aborda la situación de cobertura de agua potable en Ciudad Juárez y resaltando la importancia de mejorar las redes de distribución y abastecimiento para ayudar a resolver el problema desde la ingeniería .

Palabras clave: agua potable, redes de distribución y abastecimiento, retos globales.

Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad, la ingeniería ha jugado un papel muy importante en el avance de la civilización. A medida que la humanidad evolucionó, se fortaleció y renovó con la ayuda de sofisticadas herramientas para nuevas actividades de gran importancia como la agricultura, las tecnologías para la producción de textiles, entre muchas otras invenciones que modificaron la interacción humana y la comunicación. Entre las que destacan por su gran importancia histórica, el reloj mecánico y la imprenta, y que transformaron irrevocablemente a la humanidad. (Delgado de Cantú, 2005)

La Revolución Industrial fue una de las épocas con mayor impacto e influencia

de la ingeniería. En dicho periodo la transición social, económica y tecnológica, fueron posibles gracias a algunas de las creaciones de la ingeniería. Lo anterior se hizo particularmente evidente cuando las máquinas sustituyeron la mano de obra humana, detonando la Revolución Industrial. La más importante creación y que significó un punto de partida para este cambio en la humanidad, fue la máquina de vapor, que propició grandes avances en la ingeniería, y fue un prelude a la invención del ferrocarril y los barcos, además de convertirse en la manera más práctica en su tiempo de generar energía. (Engineering, 2008)

Otra época donde la ingeniería tuvo grandes logros en la historia fue el siglo XX. De éste período destacan la distribución de redes eléctricas y agua potable, los automóviles, los aviones, el radio y la televisión, las naves espaciales, los antibióticos, la computadora y el internet en general, éstos son algunos de los logros más destacados del siglo, en el que la ingeniería mejoró prácticamente todos los aspectos de la vida humana. (Engineering, 2008)

Sin embargo, a pesar de los grandes logros en las diferentes áreas, así también se presentan nuevos retos. Conforme la población aumenta, lo hacen también sus necesidades, es ahí donde aparecen los desafíos de seguir manteniendo esa continua evolución con la civilización. La Academia Nacional de Ingeniería en Estados Unidos identificó el abastecimiento de agua potable como uno de los principales retos para la ingeniería en el Siglo XXI (Engineering, 2008).

Acceso a Agua potable a nivel mundial

El acceso al agua potable, elemento primordial para el desarrollo de la vida humana y uno de los problemas más críticos en muchas zonas del mundo, es considerado uno de los retos primordiales en la actualidad, a continuación se presentan unos datos que soportan el argumento.

La falta de agua potable es responsable de más muertes en el mundo que la guerra. De los casi 7,000 millones de personas en el mundo, el 28% tiene Internet, mientras el 15% tiene un acceso deficiente al agua potable. En los países más pobres, la mitad de las camas hospitalarias son

ocupadas por pacientes con enfermedades relacionadas con agua contaminada o falta de saneamiento. El agua en mal estado, la diarrea y la falta de rehidratación matan a 5 mil niños al día. (Boullosa, 2012)

Las cifras demuestran que el acceso al agua potable pasa a ser un reto de prioridad inmediata. A pesar de todo el avance científico y tecnológico con el que se cuenta, existen zonas donde no se dispone de agua potable, y se debe considerar además que lo más crítico no es tanto la cantidad del recurso disponible, sino la distribución del mismo.

Acceso al agua potable a nivel nacional

De acuerdo al Programa Nacional Hídrico 2014-2018: " el agua debe ser apreciada como un elemento integrador que contribuya a dar paz a los mexicanos, para evitar conflictos y dar seguridad a todos; que contribuya a ser un factor de justicia

social, que todos los mexicanos tengan acceso al recurso de manera suficiente, asequible, de buena calidad y oportunidad para hacer valer el derecho humano previsto en el artículo 4 constitucional, que sea un elemento que contribuya a disminuir la

pobreza en el país y que propicie el bienestar social." (Gobierno de la República, 2013)

Como se puede observar el agua pasa además de ser indispensable para todos los seres vivos, a ser promotora del desarrollo sustentable de la sociedad, requisito para evitar conflictos y crear un

ambiente de justicia, donde cada cual tenga lo que le corresponde. Ahora el reto de lograr acceso universal de agua potable para todos toma aún más importancia, no solo para satisfacer una necesidad primaria, si no para cumplir un mandato constitucional y contribuir al desarrollo social.

Disponibilidad en México

México posee aproximadamente el 0.1% del total de agua dulce disponible a nivel mundial, ya que un porcentaje importante del territorio está catalogado como zona semidesértica, por lo que debemos considerar al agua no sólo como un elemento vital, sino como un factor estratégico para el desarrollo global del país. (Agua, 2006)

El reto de la gestión sustentable del agua suma además de los elementos de ingeniería, los de estabilidad social y de políticas públicas, asuntos que se deben atender integralmente para poder lograr que todos tengan acceso al agua, elemento indispensable para la vida.

La vinculación de la pobreza y la marginación con la falta de acceso al agua potable está claramente documentada: "De acuerdo con el Informe de Pobreza en México 2012 publicado por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval), el número de personas en pobreza fue de 53.3 millones, medición realizada con base en una población estimada de 117.3 millones de personas. Las personas consideradas con

carencias por acceso a los servicios básicos en la vivienda son las que no cuentan con los servicios de agua, drenaje y electricidad." (Gobierno de la República, 2013)

Todos los ciudadanos tienen el derecho al acceso, disposición y saneamiento del agua para satisfacer sus necesidades tanto personales como de uso doméstico en forma suficiente, salubre y aceptable. Lamentablemente los programas de gobierno actuales y el enfoque de atender prioritariamente las zonas urbanas hacen que quienes más padecen la carencia de agua en nuestro país sean los grupos más vulnerables (Ibáñez, 2015).

Los datos de cobertura en México se presentan en el Programa Nacional Hídrico 2014-2018: "35 millones de mexicanos se encuentran en situación de poca disponibilidad de agua en términos de cantidad y calidad." (Gobierno de la República, 2013) La disponibilidad de agua en México es de casi 4,000 m³/hab/día, considerada baja de acuerdo a los estándares del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo. (Figura 1).

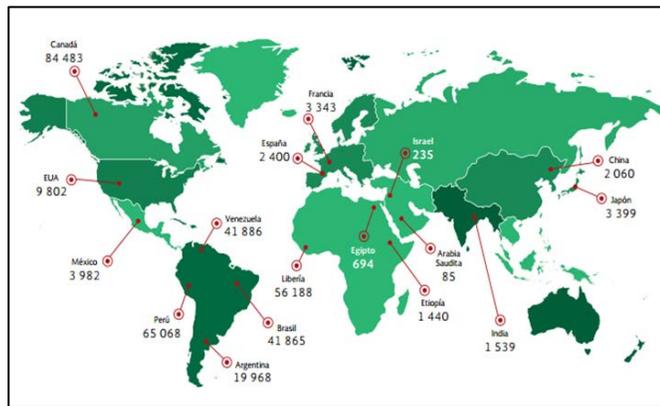


Figura 1. Disponibilidad natural media per cápita de agua en algunos países (m³/hab/año)

Por otra parte: "Al 31 de diciembre de 2012 se alcanzaron coberturas de agua potable y alcantarillado del 92.0 y 90.5 por ciento, respectivamente (Figura 2). Pese a los avances logrados, casi nueve millones de personas carecen de agua potable (cinco millones están en zonas rurales) y 11

millones de alcantarillado (7.8 millones en zonas rurales). El 97.9 por ciento del agua suministrada a las poblaciones (322.97 m³/s) se desinfecta mediante un proceso de cloración." (Gobierno de la República, 2013)



Figura 2. Evolución de las coberturas de agua potable y alcantarillado (%)

Acceso al agua potable en Ciudad Juárez

La ciudad cuenta con dos fuentes de abastecimiento, los acuíferos conocidos como: el Bolsón del Hueco y el Bolsón de la Mesilla. El Bolsón del Hueco, cuenta con 214 pozos profundos para el abasto del área urbana de Ciudad Juárez, de los cuales 193 se encuentran con equipo adecuado y los 21 restantes no tienen equipo, el Bolsón de la Mesilla mediante un sistema de extracción y conducción (acueducto) llamado Conejos-Médanos cuenta con 23 pozos profundos. (JMAS, 2013)

La Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS), dependencia

encargada del manejo y distribución del agua registra los siguientes datos acerca de la infraestructura del sistema de agua potable en Ciudad Juárez: “59 rebombos (35 inactivos y 24 activos); 49 tanques superficiales (18 inactivos y 31 activos); 24 tanques elevados (13 inactivos y 11 activos). La potabilización y la desinfección se integra por sistemas de cloración ubicada en los pozos y tanques, además de 6 casetas de osmosis inversa para el llenado de garrafones de agua potable en la zona de ANAPRA y km. 29.” (JMAS, 2013).

Cobertura en Ciudad Juárez

De acuerdo con el Censo General de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) del año 2000, la población total en el estado de Chihuahua era de 3´052,907 habitantes, con una concentración muy alta en pocas localidades. Aproximadamente el 60 por ciento se ubicaba en Ciudad Juárez y Chihuahua, mientras que el 15 por ciento residía en 10 ciudades medias y el 25 por ciento restante en las demás localidades del estado. (Gobierno del estado de Chihuahua, 2004)

Para el censo de 2010, la población del estado de Chihuahua aumentó a 3´406,465 habitantes, y la concentración urbana también, con el 85 por ciento de la población habitando en ciudades y sólo un

15 por ciento en comunidades rurales (INEGI, 2010).

De acuerdo a datos de la JMAS: La cobertura de agua potable es del 96%, el 4% restante se suministra de manera informal a un total de 14 colonias. (JMAS, 2013)

Ese cuatro por ciento de suministro informal se denomina lunares (espacios que quedaron dentro de la mancha urbana), ya que en ellos el suministro es deficiente, dentro de las 14 colonias se destacan las llamadas "Granjas" donde el suministro de agua potable es por medio de pipas. Otra zona que se encuentra en esta categoría es “El Sauzal” donde el suministro tiene deficiencias y no cuenta con una red de distribución apta para satisfacer la demanda de la zona. En este último caso, esta zona

correspondía originalmente al núcleo habitado del ejido del mismo nombre, que al estar fuera de las redes de infraestructura urbana fue quedando al margen de la cobertura del resto de la ciudad.

Con los datos contenidos en el Programa Nacional Hídrico, estas 14 colonias forman parte de los 9 millones de mexicanos que no cuentan con una disponibilidad necesaria para satisfacer sus necesidades. (JMAS, 2013) (Gobierno de la República, 2013) (Salas Plata, J. et al, 2014)

Sistemas de distribución de agua potable

Una red de distribución de agua potable es aquella encargada de proveer el líquido a los usuarios para sus diferentes necesidades, por medio de un conjunto de tuberías y accesorios que transportan el agua, desde tanques de servicio o fuentes de abastecimiento, hasta tomas domiciliarias o hidrantes públicos, donde se distribuye para diversos usos: doméstico, público, comercial e industrial. Además el sistema de distribución, debe aportar un servicio todo el tiempo, cumpliendo con algunos estándares, de cantidad, calidad y presión adecuada. (CONAGUA, 2007)

Existen criterios para definir el agua potable a nivel internacional que son adoptados en México: “La cuarta edición de las guías de calidad de agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (WHO; 2011), define el *agua potable* como aquella apta para consumo humano, uso doméstico e higiene personal, la cual no deberá generar riesgos en los consumidores. Para la OMS, la forma más eficaz de garantizar la integridad del agua en cada uno de los componentes del sistema de abastecimiento de agua potable (SAAP), desde la fuente de captación hasta el usuario

final, es la implementación de los planes de seguridad del agua (PSA), que mediante la evaluación y gestión del riesgo garantizan el suministro de agua segura y apta para el consumo humano.” (Pérez. A., 2012).

A pesar que las fuentes de abastecimiento cumplen con los requerimientos de higiene necesarios para el consumo humano, algunas veces el agua puede sufrir modificaciones en su calidad durante el transcurso por el sistema de distribución, esto debido a cuestiones como desgaste de las tuberías, ineficiente funcionamiento hidráulico y la falta de mantenimiento en los sistemas.

La pérdida de calidad del agua surge cuando se encuentran fallas en la integridad física e hidráulica del sistema de abastecimiento, lo que puede incluir contaminantes ajenos que actúan como inóculo, introduciendo sedimentos y nutrientes que disminuyen la concentración del desinfectante. Por lo tanto es importante contar con un sistema de distribución adecuado donde se asegure que el agua llegue al usuario con sus cualidades de calidad óptimas.

En la actualidad se han desarrollado tecnologías que mejoran los sistemas de abastecimiento, desde el diseño, mantenimiento o funcionamiento de los mismos. Un ejemplo es el modelo de diseño de redes de distribución de agua potable integrado con un Sistema de Información Geográfica, que desarrollaron los investigadores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Otro ejemplo

es el desarrollo de un algoritmo determinístico en donde se logra uniformizar el estado de presiones de servicio en una red de distribución de agua potable. “Lo cual mejora la habilidad del sistema de distribución para enfrentar eventuales fallas en el mismo, retarda los procesos de renovación de tuberías y minimiza el nivel de fugas en la red.” (IAGUA, 2015) (Araque. D., 2005).

Metodología

Para la realización de este documento se realizó una consulta bibliográfica de varias fuentes de información especializadas y se entrevistó a personal de la JMAS para obtener información relevante acerca del suministro de agua potable en diferentes escalas.

Conclusión

A pesar de los grandes avances tecnológicos, sigue siendo un reto para la ingeniería ya que se tiene un rezago significativo en suministro del mismo a nivel mundial. En México hay zonas donde no se cuenta con un servicio apropiado, a pesar de su alto grado de cobertura.

Hoy en día existen avances en los sistemas de distribución de agua potable que ofrecen nuevas opciones para mejorar el suministro, por lo que la ingeniería se mantiene como uno de los factores que pueden ayudar a lograr la cobertura universal en las zonas donde aún no se tiene.

Referencias

- Agua.org.mx. (2007). Agua en México . *Centro Virtual de la información del agua* , 2.
- Araque. D., S. J. (2005). Optimización operacional de redes de distribución de agua potable. *Revista de Ingeniería* , 1-7.
- Boullosa, N. (2012). 10 Tecnologías para evitar la crisis del agua potable. *Fair Companies*, 10.
- CONAGUA. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. *Comisión Nacional del Agua*, 6.
- Delgado de Cantú, G. (2005). *El mundo moderno y contemporáneo*. México: Pearson.
- Engineering, N. A. (2008). Provide access to clean water. *NAE Grand Challenges for Engineering*, 1.
- Gobierno de la República. (2013). Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. *Programa Nacional Hídrico*, 4-75.
- Gobierno del estado de Chihuahua. (2004). Plan Estatal de Desarrollo. 161.
- IAGUA. (2015). El IMTA diseña un nuevo modelo inteligente para redes de distribución. *IAGUA.com*, 2.
- Ibáñez, O. F. (2015). Agua y Salud para los Excluidos. Memorias del VIII Congreso Latinoamericano de Ciencia y Religión. Fundación DECYR, UPAEP, Instituto Elie Wiesel. 239-246.
- INEGI. (2010) México en Cifras. Chihuahua, población. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/>
- JMAS. (2013). *Actualización de plan maestro para el mejoramiento de los servicios de agua potable*. Ciudad Juárez.
- Jorge A. Salas Plata Mendoza, Hector Quevedo Urias, Angelina Dominguez, Oscar Ibáñez. (2014). Agua potable, alcantarillado y saneamiento en México, avances, retos, y desequilibrios. *Ciencia en la frontera*, 9-14.
- Perez. A., A. C. (2012). Identificación y priorización de peligros como herramientas de la gestión del riesgo en sistemas de distribución. *Revista de ingeniería*, 5.

Tenso-estructuras de cubierta

Ezael Pedroza¹, Dr. S. Tulio De la Cruz², Mtro. Alberto Rodríguez², Mtro. Eduardo Aguilera²

¹ Estudiante del Programa de Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

² Docente del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Resumen

En el documento se hace una revisión de la información disponible referente a las estructuras tensadas, cómo han ido evolucionando y cómo los métodos rudimentarios utilizados por los primeros pobladores de la tierra se utilizaban para la construcción de este tipo de estructuras, así como los elementos que las integran, sus funciones principales, las formas diversas que las componen y sus principales características. Uno de los aspectos significantes que se tratan es la forma en cómo una estructura tensada funciona, desde el punto de vista mecánico, los aspectos generales que dieron a la idea de las teorías que hacen posible el cálculo de este tipo de estructuras, los procesos constructivos para montarlas y cómo estas estructuras deben ser considerada para su análisis y diseño.

Palabras Claves: estructura tensada, tenso-estructura, velaria, cubierta.

Introducción

El desarrollo de las tenso-estructuras como cubiertas significa un avance en técnicas de mejoramiento de espacios, debido a diversos factores estructurales que presentan una ventaja sobre estructuras rígidas y con materiales pesados. Asimismo, el diseño y la construcción de estructuras de cubierta tensada dependen de las necesidades y características de un proyecto arquitectónico específico a desarrollar. Estas estructuras espaciales crean un entorno moderno, atractivo y original. La implementación de las tenso-estructuras en los últimos años hace posible abrir un nuevo

camino en el diseño arquitectónico y la construcción de estructuras que presenten variedades a diferencia de las cubiertas convencionales.

Las estructuras tensadas juegan un gran papel como estructuras flexibles ya que son conocidas por la simplicidad de ensamble de los elementos que la componen, y por su eficiencia en el uso de materiales y mano de obra, lo cual las hace superiores a otros sistemas estructurales que sirven de cubiertas.

Antecedentes

A lo largo de su historia, los hombres han buscado refugio de las inclemencias que surgen a su alrededor, buscando cobijo y protección de los sucesos que ocurren en un medio determinado. Existieron diversos métodos utilizados por el hombre para cubrir la necesidad de refugio; entre los más usados han subsistido algunos que por su practicidad, movilidad y aprovechamiento de materiales sirven como gran ejemplo para la construcción de estructuras en nuestros tiempos.

Muchas culturas alrededor del globo terráqueo construyeron refugios y desarrollaron sus propios sistemas de construcción, que surgieron de los conocimientos empíricos adquiridos a lo largo de las generaciones, por ensayo y error (Castro, Cera, & Diaz, 2010). Con el paso de los años y generaciones después, estos refugios siguieron siendo modificados por lo que las tiendas y cubiertas utilizadas no tenían un inicio determinado ni un fin establecido; es decir, simplemente se encontraban en un cambio constante.

Diversas culturas nómadas enfrentaron condiciones adversas de clima y tuvieron que realizar diseños ingeniosos que les permitieran mantenerse resguardados, mientras que otras culturas regresaban al concepto básico de una cubierta cónica, como se la que se muestra en la Figura 1. Las tiendas 'tipis' de Norteamérica eran las más adecuadas a las necesidades primarias de los indios que vivían en las vastas praderas, pues debido a su diseño de rápida maniobra, podían también ser utilizadas

como medio de arrastre para cargar provisiones (Castro, Cera, & Diaz, 2010).



Figura 1 Ejemplo de vivienda utilizada en la antigüedad.

Durante los siglos la implementación de cubiertas textiles fue retomando fuerza cuando los romanos las utilizaron como herramienta primordial para cubrirse de las inclemencias del sol en los coliseos; utilizando toldos de tela y entramados de cuerda, se podía realizar una cubierta que protegiera a los espectadores (Basset Salom, 2013). Con el paso del tiempo, la implementación de estas estructuras renacería siglos más tarde, en la década de los cincuentas, cuando después de la segunda guerra mundial la arquitectura a tensión realmente tomó su lugar actual. Algunos arquitectos a finales del siglo XX han contribuido al desarrollo de las estructuras tensadas no sólo con la geometría, sino también con soluciones a los requisitos estructurales que éstas demandan.

Tipos y clasificaciones

Las diferentes estructuras tensadas se pueden clasificar de acuerdo a su forma geométrica, la cual hace variar el anclaje y los soportes que éstas presentan; también se pueden clasificar de acuerdo a los materiales utilizados en su construcción, lo que permite una gran variedad de combinaciones en cuanto a tipos posibles de diseños.

La clasificación en cuanto a la forma de la superficie de las cubiertas distingue dos tipos: la sinclástica y las anticlástica (Basset Salom, 2013). Estas formas se pueden ver en la Figura 2.

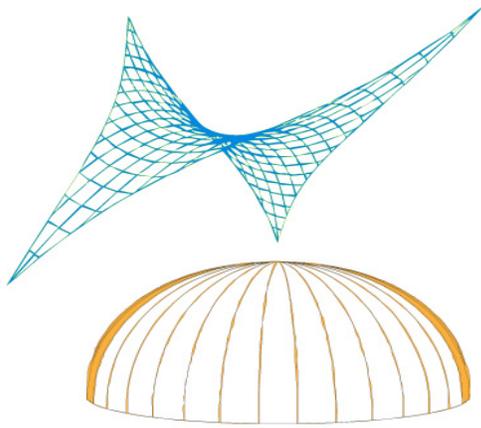


Figura 2 Ejemplos de formas anticlásticas y sinclásticas

La primera, menos utilizadas en estructuras de tensión, puede definirse como una curvatura gaussiana positiva, como ejemplo principal, puede citarse la esfera, la cual cuenta con la misma curvatura gaussiana positiva en todos sus puntos, donde los centros de las curvas se encuentran del mismo lado de superficie; algunos otros

casos de las figuras que se forman con este tipo de geometría son: las paraboloides circulares, esféricas y elípticas. En el caso de las cubiertas caracterizadas como anticlásticas existen muchas más variantes, debido a que la forma de la curva que se le da, la cual cuenta con una curvatura gaussiana negativa, principalmente se caracteriza por presentar centros de curvatura que se encuentran en direcciones opuestas y debido a esta diferencia provoca que de manera más sencilla generando fuerzas de tracción en la misma superficie, algunos ejemplos de superficies que se forman son la paraboloides hiperbólico, en forma de cono, en forma ondulada, en tipo bóveda y en forma de velas. Los elementos utilizados para darle forma a estas estructuras son los cables, mástiles, arcos y los apoyados en puntos, no solo la forma en la que trabaja el conjunto estructural si no también la forma en cómo se reparte los esfuerzos de las cargas externas, al contrario de las que se caracterizan como sinclásticas, se debe tener en cuenta que las cargas gravitatorias se encuentra en el lado cóncavo de la superficie y la succión por viento se dará encontrara en contacto con la cara convexa de la cubierta. La versatilidad de las cubiertas a tensión radica en la libertad de combinaciones que crea diversas estructuras artísticas, más siempre teniendo en cuenta que éstas trabajen a tensión con el propósito de mantener su forma.

Materiales y funcionamiento

Durante el último siglo el descubrimiento de nuevos materiales y las nuevas aplicaciones de los ya existentes han sido el complemento para transformar los diseños e ideas, además el mejoramiento ayuda a que los materiales puedan realizar diferentes tareas que contribuyan en la eficiencia de las estructuras de cubierta. Un ejemplo claro de los cambios que se han realizado con el paso del tiempo es la implementación de textiles no provenientes de materiales orgánicos, ya sea pieles de animales o tejidos naturales ya que debido al descubrimiento de materiales fácilmente moldeables como el plástico, se pudo implementar una serie de diversos tejidos a base de muchos materiales diversos, debido a que en el caso de la mayoría de las estructuras de cubiertas tensadas la parte primordial que le otorga las ventajas de ligereza y practicidad dependen del material textil con el que se realice la estructura, los materiales utilizados tienden a ser una combinación que le otorga resistencias y características diversas las cuales dependen de las necesidades que requiera el proyecto. En su mayoría los textiles que se utilizan están hechos con materiales plásticos como lo son el PVC, *nylon*, politetrafluoroetileno, fibra de vidrio con teflón, poliéster y en algunos casos fibra de carbono también conocida como *kevlar* (de Oliveira Pauletti, 2011). El producto formado puede contener diversas combinaciones de éstos y en diversas proporciones, ya sea para aumentar su resistencia a esfuerzos o a condiciones adversas de la intemperie.

Las estructuras convencionales de concreto, acero, madera o mampostería, tienen dos propiedades principales que les

brindan estabilidad y la capacidad de transmitir cargas, éstas son: la inercia y la rigidez (Castro, Cera, & Diaz, 2010). Es por eso que el componente de la estructura que le otorga la caracterización principal de cubierta es la membrana o textil, gracias a las características de los materiales textiles que pueden adquirir formas peculiares. Asimismo, las membranas o textiles cuentan con diversas combinaciones de materiales que le dan una alta calidad y vida útil, por ejemplo, en las membranas comúnmente se establece una combinación de capas, las cuales cuentan con diversos propósitos a la hora de su funcionamiento; en estas capas se encuentran materiales como bases de tejido, los cuales son los encargados de la resistencia. Otras capas de PVC cuales cubren de los rayos solares y agentes atmosféricos que puedan reducir la vida útil del material; por último, también se encuentra una capa impermeabilizante que permite la evacuación de las aguas de lluvia y la humedad que su pueda presentar.

En el diseño de una estructura de cubierta tensada se puede utilizar otro material, el cual, junto con las membranas y textiles, se considera como material flexible que conforma la estructura tensada. Los cables, principalmente de acero, son los conforman una de las bases estructurales en la construcción de cubiertas tensadas. El cable de acero es un elemento estructural simple, que está compuesto de un conjunto de elementos que transmiten fuerzas, movimientos y energía entre dos puntos, de una manera predeterminada para lograr un fin deseado (Tigo & Vinicio Carranza, 2011). Esta característica del cable hace que su utilización en estructuras tensadas sea de

las más comunes debido a las formas y fuerzas que se generan en éstas.

La principal función que ejercen los cables en las estructuras de cubierta es el de actuar como tensores que refuerzan la membrana textil, la cual permite mantener su forma al ser conectado al elemento rígido que soporta la cubierta. Otro elemento que se caracteriza por ser flexible son las relingas, elementos que permiten reforzar el borde de la membrana, donde tiende a acumularse gran parte de la tensión, además de servir como elemento de transición entre dichos bordes y los puntos de fijación o anclaje (Basset Salom, 2013). Más que elementos flexibles estos pueden ser considerados como uno de los materiales más importantes a la hora de las consideraciones en el diseño de una estructura de cubierta por lo que tienden a ser sustituidos como elementos de mayor rigidez.

En las estructuras de tejido tensado donde la estructura de apoyo consiste en el mástil, la tela está suspendida de cables colgados del mástil u otros elementos de compresión (Henrysson, 2012). Principalmente los elementos que constituyen la parte rígida están constituidos por mástiles o postes, los cuales se encargan de soportar las fuerzas que se transmiten de los elementos colgantes manteniendo la estabilidad y forma de los elementos flexibles, estos elementos rígidos no son los únicos que se encuentran en las tenso-estructuras, también existen los puntos de anclaje los cuales, al igual que los mástiles, tienden a estar sujetos a una superficie estática a la cual le transmiten los esfuerzos resultantes de la estructura colgante

introduciendo y manteniendo la tensión necesaria a los elementos flexibles.

Existen diversos tipos de anclaje, los cuales se diferencian por su función con respecto al comportamiento en la estructura. En la Figura 3 se puede observar un ejemplo de anclaje y soporte.

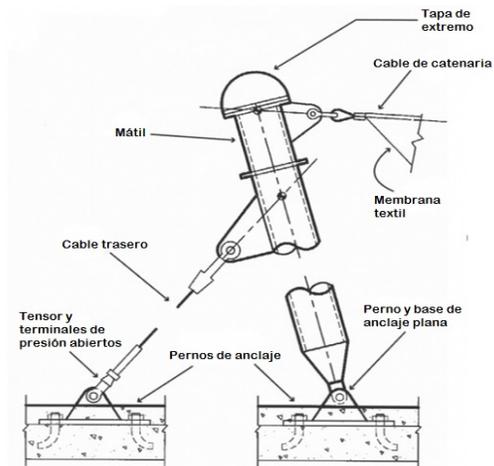


Figura 3 Ejemplo de un sistema de soporte

Existen los estáticos o rígidos que son aquellos que no permiten movimiento en diversas direcciones y mantienen una rigidez, mientras que en algunos otros tipos hay elemento que permiten movimientos como rotación en varias direcciones o restringidos a sólo una dirección, estos elementos se deben de caracterizar por no permitir que las fuerzas de tracción se pierdan aunque permitan los movimientos de rotación, esto es debido a que si la fuerza de tensión en el anclaje se pierde, la forma de la tenso-estructura cambiará y los análisis no se habrán establecido para las nuevas dimensiones de la estructura.

Comportamiento mecánico

En una estructura tensada su principal comportamiento se basa en la tensión producida por los anclajes y mástiles. A diferencia de las estructuras convencionales donde su comportamiento se basa en su peso y su rigidez, como las estructuras de piedra, concreto, acero y madera, que son estas propiedades las que hacen posible una transmisión de cargas a las bases de éstas, en las estructuras tensadas no se cuenta con estas características, debido a que el peso y la rigidez, en el área de distribución de cargas, es mucho menor.

Debido a las características de rigidez de las estructuras de cubiertas tensadas, los materiales se ven pretensados con el propósito de incrementar la rigidez en los elementos que componen el sistema y estos encuentren la estabilidad y el equilibrio al momento de la aplicación de las cargas, el comportamiento de las estructuras de tensión se puede dividir en tres fases (Santoso, 2004); en la primera la membrana o cables se desdoblán de la posición de reposo hacia una etapa de esfuerzos incipientes, en la segunda etapa comienzan las deformaciones por las cargas muertas que se le aplican a la estructura y para finalizar en la etapa de servicio donde se le aplican cargas vivas y dinámicas a la estructura, creando un comportamiento no lineal.

Además, si por un lado los elementos estructurales básicos de las estructuras tensadas son posiblemente los elementos más simples en ser formulados matemáticamente, por otra parte el comportamiento estructural de estos elementos trabajando en conjunto es

esencialmente no lineal, en la mayoría de los casos invalidando el uso de soluciones analíticas (de Oliveira Pauletti, 2011). Se sabe que el comportamiento natural intrínsecamente no lineal de las estructuras tensadas ha hecho que el análisis de estas estructuras sea diferente al de las estructuras rígidas que suelen calcularse con métodos lineales en los que se tienen pequeñas deformaciones elásticas y desplazamientos, el estudio durante las últimas décadas se concentró en el desarrollo de sistemas de análisis para este tipo de estructuras. Uno de los primeros arquitectos en desarrollar una teoría para el comportamiento de este tipo de estructura fue Frei Otto, quien analizó burbujas de jabón que se encontraban entre dos soportes donde se encontraba que la burbuja estaba a tensión en cada punto y el área de la superficie era mínima (Lewis, 2013). Este método se utilizó para análisis computacionales posteriores, ver Figura 4.

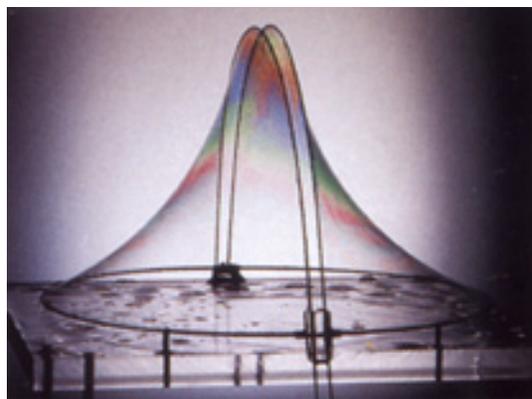


Figura 4 Imagen del experimento de burbujas de jabón

Hoy en día para calcular los modelos de estructuras tensadas se realiza conforme a programas computacionales que dan una gran aproximación al comportamiento de la

superficie, el proceso computacional para encontrar la forma, aborda la cuestión de cuál es la configuración geométrica detallada de una superficie cuyos límites de claro están dados y se asume una pretensión satisfactoria (Lewis, 2013). Estos sistemas computacionales existentes se basan en la implementación del método de elemento finito, el cual se aplica popularmente en ingeniería, ya que la tecnología informática está muy desarrollada, lo suficiente como para calcular estructuras complicadas con

mallas muy finas, y las estructuras de tejido puede llevarse a cabo en base a la geometría de la malla hecha con elementos finitos. Por lo tanto los modelos numéricos de estructura de la tela utilizando el método de elementos finitos es ampliamente utilizado en las estructuras de tela en cuanto a diseño y el análisis, a pesar de que los modelos físicos todavía están a menudo fabricados y probados para un concepto general de diseño (Zhang, 2010).

Nuevas consideraciones de diseño

Al realizar un proyecto de obra o el diseño primordial de una estructura siempre se consideran diversos factores los cuales influyen directamente en la construcción o implementación del diseño, muchos de los factores son de conocimiento estructural relevante o que comúnmente se ven en proyectos de obra, aunque cada proyecto es diferente, el diseño de una estructura tensada no solo se basa en encontrar una geometría adecuada, antes se deben revisar diversos requerimientos tales como la apariencia, requerimientos estructurales, clima, medio ambiente, sostenibilidad y construcción (de Llorens Duran, 2011). Durante estos pasos se ira definiendo la geometría a implementar en el diseño.

Una vez contando con diagramas y diseños preliminares la siguiente consideración debe ser la estimación de cargas con las que tendrá contacto la estructura tensada. Para ello, los códigos y

normas aplicables deben de tomarse en cuenta. La respuesta de una estructura tensada a las cargas de proyecto gira en torno a una configuración de equilibrio inicial, o configuración viable, en la que la membrana (o red de cables) está reforzada por el efecto de las cargas permanentes, básicamente, las cargas de peso propio y de tensión de la membrana (Ruy Marcelo, 2011,32). Los métodos de análisis para estos modelos se basan en la distribución de cargas en un cable. Una costumbre en la práctica profesional es diseñar este tipo de estructuras únicamente por peso propio, tal y como se hace en arquitectura, cuidando únicamente las recomendaciones del fabricante de la lona o material textil (Hernandez Barrios, Valdes Vazquez, & Hernandez Martinez, 2010). Es por ello que el análisis de cargar de viento es uno de los factores relevantes que intervienen en los cálculos.

Metodología

Las estructuras de cubierta tensada pueden encontrarse de diversas configuraciones. Debido a que la estructura misma tiene el nombre coloquial de velaria, la búsqueda comienza con aspectos arquitectónicos, tales como las formas que existen o las geometrías que se pueden formar con las superficies flexibles, los resultados que también pueden ser esperados tienen que ver con la utilización que pueden tener las estructuras de cubiertas con este tipo de características, la bibliografía que se obtiene de realizar esta búsqueda son las características de cómo están conformadas fisiológicamente. Luego de las características que se tienen en ámbitos constructivos, se considera el comportamiento mecánico de los materiales y el comportamiento estructural que tiene la construcción en conjunto; en estas consideraciones se encuentran aspectos que se centran en el análisis y diseño de este tipo de estructuras y como subdivisión se encuentran las consideraciones a tomar a la hora del análisis.

Una vez recabada la información, ésta se organiza y cataloga dependiendo del

criterio preferido; el utilizado para este documento se basó principalmente en la disponibilidad de los documentos que se utilizaron, pues eran de libre acceso. Otro de los criterios utilizados fue la fecha en la que se realizó el documento, que tuviera una diferencia entre la fecha de realización y la actualidad, menor a 5 años. Uno de los factores importantes en la categorización de la información es la viabilidad y la confiabilidad de la fuente, lo cual le da certeza para ser utilizada como marco de referencia. La información que se cataloga como aceptable para la revisión se rescata de la fuente para uso propio en el artículo; también la información referente a la fuente de donde se está obteniendo la información para referenciar. Aunque la fiabilidad de la información se tomó como factores para categorizarlo, se revisa nuevamente para que la validez de ésta información utilizada en el artículo no sea puesta en duda. La importancia de conocer si la información que se recaba para las referencias son de una calidad acorde con el documento es debido a que serán el reflejo del contenido del documento.

Conclusiones

Las tenso-estructuras son una alternativa para usarse en cubiertas para sombra. La implementación de estas estructuras puede ser establecida en cualquier lugar donde las condiciones del proyecto lo permitan. La innovación en aspectos constructivos se está dando por la eficiencia en el uso de los materiales por ámbitos económicos y ecológicos, lo cual implica un reto a la imaginación e ingenio, siendo una alternativa con grandes ventajas, aunque toda estructura cuenta con sus dificultades de implementación las tenso estructuras llevan una ventaja favorable en estructuras de cubierta, la versatilidad de adaptación solo se ve limitada por la capacidad del que implementa este sistema de estructuras.

Según Valdez Pérez (Valdez Pérez, 2013), las tenso estructuras han tenido un papel relevante en la supervivencia de los primeros pobladores y su innovación ha permitido que se sigan desarrollando en la actualidad, aunque se considere que el uso limitado en la funcionalidad de estas estructuras representa un problema, en realidad podría verse como una implementación de conocimientos para un área establecida. La construcción de tenso-estructuras debería ser una práctica común para usarse en las cubiertas que se requieren en nuestra región.

Referencias

- Ambroziak, A., & Klosowski, P. (2010). Example of tension fabric structure analysis. *Gdansk University of Technology*, 1-10.
- Basset Salom, L. (2013). *Tensoestructuras*. Valencia: Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universidad Politécnica de Valencia.
- Castellanos Espinosa, E. A. (2012). *Estudio analítico experimental de una lonaria sujeta a efectos dinámicos por viento*. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Castro, S., Cera, R. A., & Diaz, H. (2010). *Tenso estructuras: Investigación*. Venezuela: Facultad de arquitectura y urbanismo.
- Construccion y Vivienda. (2014). *Tensoestructuras. Suplementos especiales: Materiales y procesos*, 8-84.
- De Llorens Duran, J. (2011). *Los detalles constructivos de las tenso estructuras*. Barcelona: Escuela de Arquitectura de Barcelona.
- De Oliveira Pauletti, R. (2011). Anotaciones sobre el proyecto y el análisis de las estructuras tensadas. *Entre rayas*, 30-41.
- Gamboa, M., Hincz, K., & Tun Cruz, V. (2011). Medición de presiones aerodinámicas en una estructura de membrana. *Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 9-24.
- Henrysson, E. (2012). *Analysis of Membrane Structures*. Göteborg: CHalmers University of Technology.
- Hernandez Barrios, H., Valdes Vazquez, G., & Hernandez Martinez, A. (2010). *Procedimiento simplificado de diseño eólico de tenso estructuras*. Guanajuato: Congreso nacional de ingeniería estructural.
- Lewis, W. J. (2013). Modeling of fabric structures and associated design issues. *Journal of architectural engineering*, 1-15.
- Muñiz Martín, E. (2014). *Análisis dinámico de las tenso estructuras: Propuesta de metodología de cálculo y software aplicado*. Cataluña: Universidad Politecnica de Cataluña.
- Primachenko, B. M. (2014). Engineering geometry method for modeling the structure and performance characteristics of fabric articles for technical purposes. *Fibre Chemistry*, 45-53.
- Santoso, K. (2004). *Wide-Span Cable Structures*. California: University of California.
- Shibo, R. (2008). *Analysis of Tent Structures*. Delft: Delft University of Technology.
- Tigo, F., & Vinicio Carranza, A. (2011). Cálculo y diseño estructural para la cubierta del mercado central. *Escuela Politecnica del Ejército*, 365.
- Ungureanu, N., CĂCIULĂ, S.-D., & Vrabie, M. (2010). About some suspension roofs made of the orthogonal cable networks. *Gheorghe asachi technical university*, 1-110.
- Valdez Pérez, F. (2013). *Cubiertas Velarias: las tensoestructuras*. Mexico: Facultad de Estudios Superiores de Acatlán.
- Zhang, L. (2010). Reliability analysis of fabric structures. *Newcastle University: Newcastle upon tyne.*, 1-15.
- Zhibin, L., Ruojun, Q., & Xingfei, Y. (2012). Erection Analysis of Large-Scale Radial Cable Net. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 1-5.

Optimización Multiobjetivo de la Estructura de una Silla utilizando un Híbrido de Redes Neuronales Artificiales y NSGA-II

A. Alvarado-Iniesta, DJ Valles-Rosales, A Del Valle, JL García-Alcaraz, ND Pérez-González

¹Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

²Department of Industrial Engineering, New Mexico State University

Resumen

Se presenta un híbrido de redes neuronales artificiales y NSGA-II para la optimización multiobjetivo del diseño de una silla estándar con respecto a medidas estructurales. Los objetivos a optimizarse son la deformación y peso de la silla. Se realizan simulaciones por computadoras para obtener ambas respuestas de interés. Las variables de diseño se establecen en base a optimización de dimensiones. Redes neuronales artificiales son empleadas para mapear la relación entre las variables de diseño y los variables de salida. Después, NSGA-II es usado para encontrar el conjunto de soluciones óptimas de Pareto. Los resultados muestran que la metodología empleada brinda al diseñador versatilidad y robustez de escoger diferentes escenarios de acuerdo con las necesidades actuales de diseño en términos de estructura de la silla.

Palabras Claves: Redes Neuronales Artificiales, Optimización Multiobjetivo, NSGA-II, Optimización Estructural.

Introducción

La optimización estructural se define como hacer un ensamble de materiales destinados a sostener cargas de “la mejor” manera (Christensen & Klarbring 2009). Mejor podría referirse a que la estructura sea lo más ligera posible, es decir, minimizar su peso, o hacer la estructura tan firme como sea posible. Por lo tanto, un conjunto de medidas sobre el rendimiento estructural podría estar integrado por: el peso, la rigidez, la carga crítica, el estrés, el desplazamiento y la geometría. Por lo tanto, un problema de optimización estructural

podría ser formulado por la elección de una de ellas como una función objetivo que debe ser maximizada o minimizada (Christensen & Klarbring 2009). En la mayoría de los problemas de optimización del mundo real, varios objetivos deben ser optimizados simultáneamente con el fin de obtener una solución satisfactoria (peso, rigidez, etc.) (Stadler 1986). Estos objetivos suelen estar en conflicto y son no conmensurables (Coello & Christiansen 2000). A diferencia de los problemas con un solo objetivo, los problemas multi-objetivo normalmente tiene no sólo una, sino un

conjunto de soluciones, que son igualmente satisfactorias. Esto lleva a la búsqueda de un conjunto de soluciones que conforman el conjunto óptimo de Pareto, cuyos elementos correspondientes son llamados no dominados o no inferiores.

En general, los problemas de optimización estructural podrían dividirse en tres clases: optimización de tamaño, forma, y topología (Christensen y Klarbring 2009). Varios trabajos han sido publicados sobre este tema. Por ejemplo, Narayanan y Azarm (1999) presentaron una mejora mediante el uso de un algoritmo genético multiobjetivo para la optimización del diseño de estructuras y vigas. En 2000, Coello y Christiansen propusieron un algoritmo genético multiobjetivo para la optimización del diseño de estructuras. Abe et al. (2004) presentaron un estudio para la determinación de la construcción de un neumático óptimo basado en el análisis de elemento finito (FEA) y el algoritmo genético (GA). Del mismo modo, Rodríguez et al. (2005) trabajaron en la optimización multiobjetivo del bastidor de una motocicleta chopper basados en GA y FEA. En 2007, Weigang y Weiji trabajaron en la optimización del diseño de una estructura pilón de un avión usando un algoritmo interactivo multiobjetivo por enjambre de partículas. Lee et al. (2012) presentaron un algoritmo evolutivo multiobjetivo paralelo para la optimización del diseño de placas compuestas multicapa. Recientemente, Quaglia et al. (2014) presentaron un enfoque de optimización multiobjetivo para equilibrar la eficiencia energética y el rendimiento estructural en casas de campaña desplegadas.

Las medidas de desempeño estructural son puramente mecánicas; por ejemplo, no se consideran aspectos funcionales, económicos, estéticos, o ergonómicos. Para estructuras mecánicas, la optimización se realiza comúnmente por medio de métodos con base en simulaciones computacionales, como el análisis del elemento finito (FEA). Los modelos FEA requieren mucho esfuerzo, y no son adecuados para grandes análisis repetitivos que con frecuencia son necesarias en un algoritmo de optimización. Por lo tanto, se emplean modelos de sustitución basados en diversas metodologías (modelos de kriging, superficie de respuesta, redes neuronales artificiales) por su capacidad para aprender y de mapear la compleja relación no lineal entre las variables de diseño y las respuestas de interés. Recientemente, varios investigadores han combinado FEA, modelos de sustitución y algoritmos evolutivos para obtener buenas soluciones en diferentes problemas de optimización en ingeniería. Por ejemplo, Rodríguez et al. (2005), combinaron FEA y algoritmos evolutivos para la optimización del diseño de un bastidor de motocicleta. Magnier y Haghghat (2010) presentaron un artículo sobre la optimización del diseño de edificios mediante el uso de GA y redes neuronales artificiales (ANN) como modelo de sustitución. En el 2013, Serafinska et al. trabajaron en la optimización del diseño estructural de neumáticos mediante FEA y ANN. Bahraminasab et al. (2014) propusieron la optimización del diseño de un implante de rodilla usando la metodología de superficie de respuesta (RSM) y FEA. En el mismo año, Asadi et al. (2014) presentaron un artículo de la

optimización multiobjetivo de la retroadaptación de edificios con GA y ANN. Cazacu y Grama (2014) presentaron un trabajo en el que optimizan la topología, el tamaño y la forma de estructuras planas utilizando GA y FEA. Del mismo modo, estas metodologías se han aplicado en procesos de manufactura, como el moldeo por inyección de plástico (Chen et al 2010; Cheng et al 2013; Kitayama y Natsume 2014).

En este artículo, simulaciones computacionales (FEA), ANN y algoritmos genéticos multiobjetivo se aplican para la optimización estructural de una silla

convencional. Las variables de diseño consideradas se refieren a las dimensiones de la silla (optimización de dimensiones). Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II), propuesto por Deb et al. (2002) se utiliza para encontrar el conjunto de soluciones óptimas de Pareto. Las medidas de rendimiento son el peso y el desplazamiento de la silla. Por lo tanto, sólo los aspectos mecánicos se consideran en el problema de optimización. La siguiente sección explica la metodología seguida y los resultados obtenidos y las conclusiones se presentan en la última sección del documento.

Metodología

La metodología utilizada se divide en 3 etapas. La etapa 1 se centra en la recolección de datos a través de simulaciones computacionales. La etapa 2, es el híbrido de Redes Neuronales Artificiales (ANN) y la implementación de Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II). La última etapa es la validación de los resultados.

Fase 1: Recolección de datos

La Figura 1 muestra la silla para optimizar en función del diseño del marco.

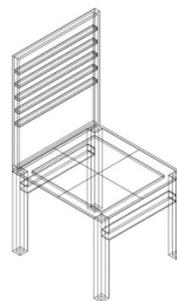


Figura 1. Estructura de la Silla

Las variables de diseño consideradas y sus rangos de diseño se muestran en la Tabla 1.

Así mismo, la Figura 2 muestra una representación de cada variable en el diseño de la silla.

Variable	min	max	
Ancho del asiento x_1	1	10	mm
Ancho del soporte del asiento x_2	0	10	mm
Dimensión de la pata x_3	15	50	mm
Ancho de la pared de la pata x_4	10	100	%
Ancho del soporte de patas x_5	0	40	mm

Tabla 1. Variables de diseño

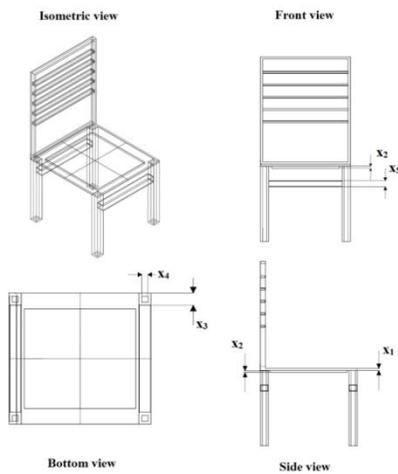


Figura 2. Variables de diseño

Un diseño factorial fraccionado se emplea para la recolección de datos; además, se añaden algunas corridas adicionales para el conjunto de datos basado en el enfoque de Morris y Mitchell (1995).

Por medio de simulaciones computacionales, la técnica del análisis del elemento finito (FEA) se utiliza para calcular la deformación (mm) en el asiento de la silla cuando se aplica una fuerza de 2000N en él, la Figura 3 muestra una representación. El peso (Kg) de la silla se da automáticamente por la simulación. El material seleccionado para toda la silla es Plástico ABS.

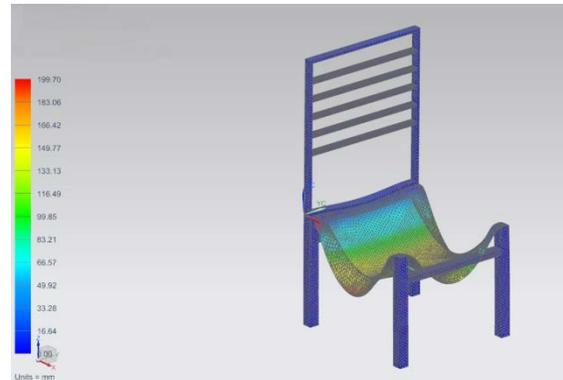


Figure 3. FEA de la silla

Un total de 48 pares de datos de entrada-salida se obtuvieron de las simulaciones. La

Figura 4 muestra una representación de los datos para las variables de salida.

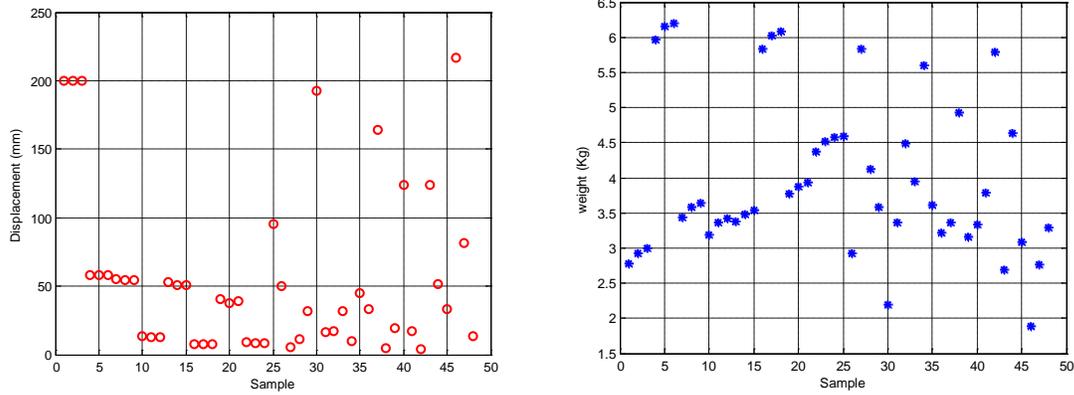


Figura 4. Datos de salida

Como se ve de la Figura 4, el rango de desplazamiento esta entre 0 y 220 mm aproximadamente, y el peso de la silla es de 1,5 a 6,5 kg.

Fase 2: Híbrido de redes neuronales artificiales y NSGA-II

El problema de optimización multiobjetivo se define como,

Encontrar X^*

$$= [Asiento(x_1^*), Soporte\ del\ Asiento(x_2^*), Pata(x_3^*), \% \ offset(x_4^*), Soporte\ de\ patas(x_5^*)]$$

$$Min f(X) = [f_1(X), f_2(X)]$$

s. a.

$$1 \leq x_1 \leq 10 \text{ milímetros}$$

$$0 \leq x_2 \leq 10 \text{ milímetros}$$

$$15 \leq x_3 \leq 50 \text{ milímetros}$$

$$10 \leq x_4 \leq 100 \quad \%$$

$$0 \leq x_5 \leq 40 \text{ milímetros}$$

(1)

Siendo $f_1(X)$ la función de costo que representa el valor de la deformación (mm), y $f_2(X)$ el peso de la silla (kg).

La Figura 5 muestra una representación gráfica del híbrido de ANN y NSGA-II.

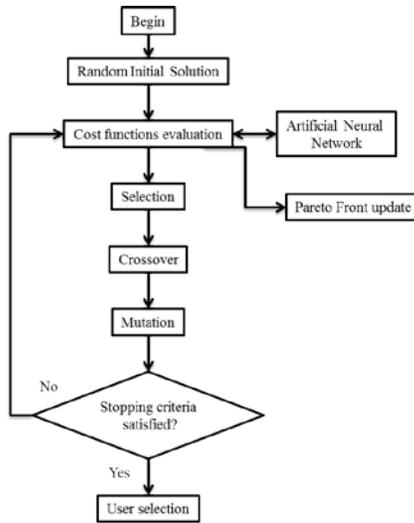


Figura 5. Híbrido ANN NSGA-II

Una red neuronal artificial con propagación hacia adelante con 5-20-1 y una 5-15-1 se desarrolla para hacer modelos aproximados entre las variables de diseño y la deformación y el peso de la silla, respectivamente. La Figura 6 muestra una representación del diseño de la NN. Los datos recolectados en la etapa 1 se utilizan para entrenar las redes mediante el uso del algoritmo de propagación hacia atrás (Backpropagation).

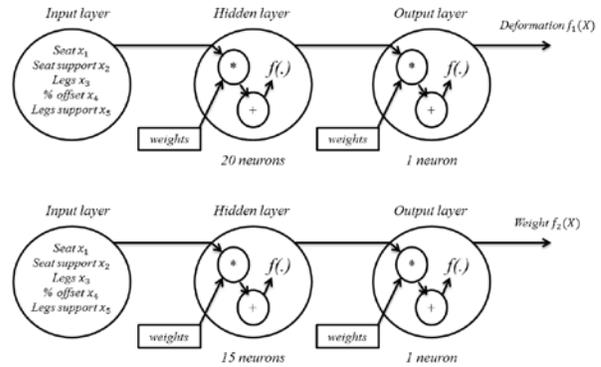


Figura 6. Redes neuronales artificiales

El procedimiento NSGA-II se muestra en la Figura 7. Los individuos se ordenan según la dominancia y crowding distance.

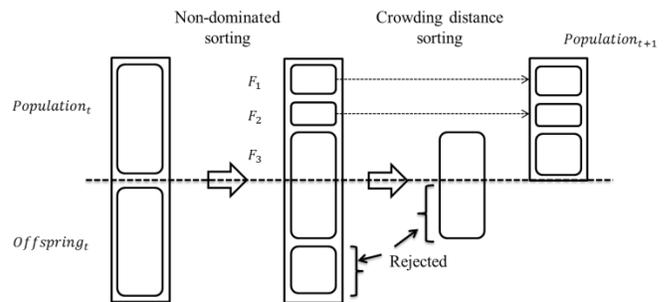


Figura 7. Procedimiento NSGA-II

Fase 3: Validación de los resultados

Una vez que se encuentra el conjunto de soluciones óptimas de Pareto, se llevan a cabo simulaciones por computadora para evaluar cada una de las soluciones obtenidas.

Resultados

Fase 2: Híbrido de redes neuronales artificiales y NSGA-II

Una vez que la red neuronal esta entrenada, es necesario que sea probada. Se emplean cinco muestras tomadas de las simulaciones para probar la capacidad de aproximación

de las redes. La Figura 8 muestra el valor de la simulación vs el valor de predicción dado por la red neuronal. El error de predicción es de alrededor de 5% en promedio; por lo tanto, la red neuronal diseñada es empleada como modelo de sustitución en la ecuación (1).

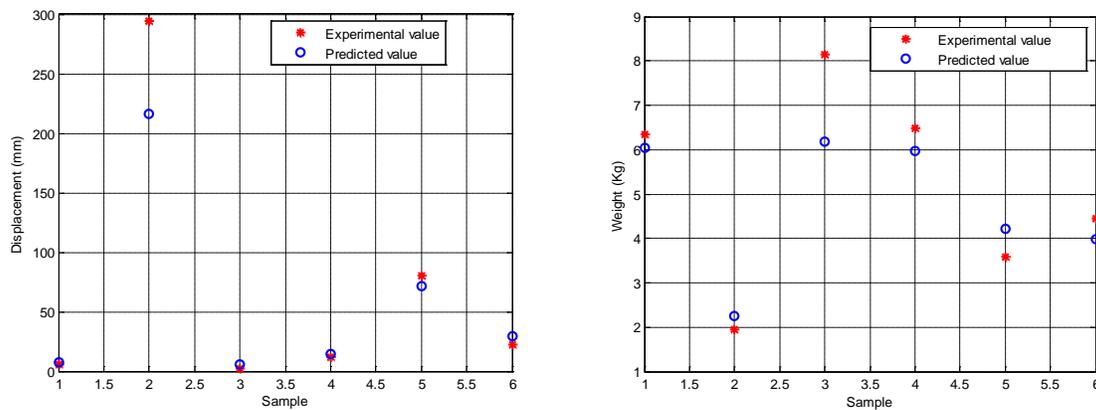


Figura 8. Muestras del ensayo

Un cruce binario simulado y una mutación polinómica se utilizan para el NSGA-II. La probabilidad de cruce es $p_c = 0,9$ y la probabilidad de mutación es $\eta_c = 0,1$. Los índices de distribución de los operadores de cruce y mutación son $\eta_c = 20$ y $\eta_p = 20$,

respectivamente. El tamaño de la población es de 40, y la generación máxima se establece en 400. La Figura 9 muestra el frente de Pareto encontrado por el problema descrito en la ecuación (1).

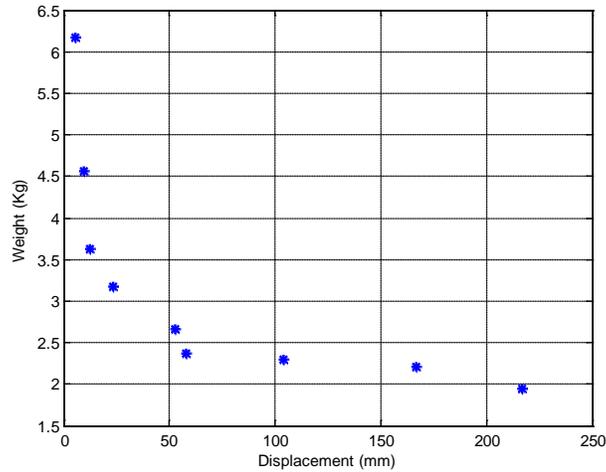


Figura 9. Frente de Pareto

Fase 3: Validación de la Solución

El valor óptimo para cada variable de diseño se muestra en la Tabla 2. Además, se muestra el valor de la función objetivo obtenido haciendo el FEA en la simulación computacional.

Tabla 2. Validación de la simulación por computadora

Solución	$f_1(X)$	$f_2(X)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	262.900	1.052	1.000	0.001	15.001	21.156	10.221
2	2.327	7.778	10.000	10.000	48.921	76.956	40.000
3	13.690	3.696	8.729	0.913	36.499	26.182	13.790
4	38.760	2.694	3.938	3.990	37.459	14.329	9.360
5	20.490	3.223	4.674	7.427	25.930	29.925	11.626
6	49.940	2.501	4.057	3.472	29.832	17.708	8.962
7	38.030	2.981	4.982	2.355	34.791	25.304	19.465
8	10.217	4.259	8.920	1.643	40.492	32.457	17.159
9	75.690	2.373	3.938	1.490	37.459	14.329	9.360

La Figura 10 muestra la solución 8 de la Tabla 2. Esta figura sólo muestra el desplazamiento que es igual a 10 mm.

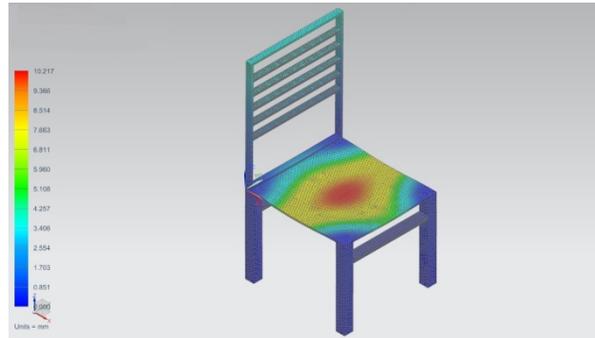


Figura 10. Solución 8

De los resultados, se observa la diferencia entre cada una de las soluciones en comparación con los dos objetivos a ser optimizados. Es decir, cualquiera de las soluciones puede ser elegida en función de la prioridad o las necesidades actuales de diseño. Si lo que se desea es un desplazamiento mínimo (calidad superior), se puede elegir la solución 2; sin embargo, el peso es el máximo dentro del conjunto de soluciones (el más caro). Por otro lado, si se

desea el peso mínimo (más barato), se puede seleccionar la solución al 1 pero siempre teniendo en cuenta que la solución tiene el desplazamiento máximo (de baja calidad). Por lo tanto, la metodología empleada da al diseñador la versatilidad y robustez de la elección de diferentes escenarios de acuerdo con las necesidades actuales de diseño con respecto a la estructura de una silla.

Conclusiones

Este estudio presenta un híbrido de ANN y NSGA-II para la optimización multiobjetivo en el diseño de una silla en términos de diseño estructural. Simulaciones por computadora se llevan a cabo para la recolección de datos con el fin de ajustarse a un modelo de sustitución basado en redes neuronales artificiales que sustituyen las simulaciones por computadora. Después, un algoritmo multiobjetivo se utiliza para encontrar el conjunto de soluciones óptimas de Pareto. Los resultados muestran que la metodología empleada tiene la flexibilidad y robustez de considerar diferentes casos de acuerdo con las preferencias de diseño. Trabajos futuros deben centrarse en la consideración de aspectos adicionales, tales como ergonómicos y funcionales.

Referencias

- Abe A, Kamegawa T, Nakajima Y (2004) Optimization of construction of tire reinforcement by genetic algorithm. *Optimization and Engineering* 5:77-92.
- Asadi E, Gameiro da Silva M, Henggeler-Antunes C, Dias L, Glicksman L (2014) Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application. *Energy and Building* 81:444-456.
- Bahraminasab M, Sahari B, Edwards K, Farahmand F, Hong T, Arumugam M, Jahan A (2014) Multi-objective design optimization of functionally graded material for the femoral component of a total knee replacement. *Materials and Design* 53:159-173.
- Cazacu R, Grama L (2014) Steel truss optimization using genetic algorithms and FEA. *Procedia Technology* 12:339-346.
- Chen W, Zhou X, Wang H, Wang W (2010) Multi-objective optimal approach for injection molding based on surrogate model and particle swarm optimization algorithm. *Journal of Shanghai Jiaotong University* 15:88-93.
- Cheng J, Liu Z, Tan J (2013) Multiobjective optimization of injection molding parameters based on soft computing and variable complexity method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 66:907-916.
- Christensen P, Klarbring A (2009) *An introduction to Structural Optimization*. Springer, Canada.
- Coello C, Christiansen A (2000) Multiobjective optimization of trusses using genetic algorithms. *Computers and Structures* 75:647-660.
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T (2002) A fast and elitist multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6(2):182-197.
- Kitayama S, Natsume S (2014) Multi-objective optimization of volume shrinkage and clamping force for plastic injection molding via sequential approximate optimization. *Simulation Modelling Practice and Theory* 48:35-44.
- Lee D, Morillo C, Bugeda G, Oller S, Onate E (2012) Multilayered composite structure design optimization using distributed/parallel multi-objective evolutionary algorithms. *Composite Structures* 94:1087-1096.
- Magnier L, Haghghat F (2010) Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and artificial neural network. *Building and Environment* 45:739-746.
- Morris M, Mitchell T (1995) Exploratory designs for computational experiments, *Journal of Statistical Planning and Inference* 43:381-402.
- Narayanan S, Azarm S (1999) On improving multiobjective genetic algorithms for design optimization. *Structural Optimization* 18:146-155.
- Quaglia C, Yu N, Thrall A, Paolucci S (2014) Balancing energy efficiency and structural performance through multi-objective shape optimization: Case study of a rapidly deployable origami-inspired shelter. *Energy and Building* 82:733-745.
- Rodríguez J, Medaglia A, Casas J (2005) Approximation to the optimum design of a motorcycle frame using finite element analysis and evolutionary algorithms. In: Bass E (ed) *Proceedings of the 2005 Systems and Information Engineering Design Symposium*. IEEE, Virginia, pp. 277-285.
- Serafinska A, Kaliske M, Zopf C, Graf W (2013). A multi-objective optimization approach with consideration of fuzzy variables applied to structural tire design. *Computers and Structures* 116:7-19.
- Stadler W (1986) Multicriteria optimization in mechanics (a survey). *Applied Mechanics Reviews* 37(2):277-286.
- Weigang A, Weiji L (2007) Interactive multi-objective optimization design for the pylon structure of an airplane. *Chinese Journal of Aeronautics* 20:524-528.

NODO SENSOR INALÁMBRICO PARA MEDIR ILUMINACIÓN

Dr. Ernesto Sifuentes de la Hoya, Dr. Rafael González Landaeta, M.I. Gabriel Bravo Martínez,
Ing. Reyna G. Moreno Hernández

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Resumen

Una iluminación adecuada ayuda a prevenir accidentes, reducir problemas de salud, mejorar el rendimiento laboral y la concentración. En diversas áreas de trabajo, esparcimiento y vialidades la iluminación se mide habitualmente de forma manual para saber si cumple con las normas. Este artículo presenta la implementación de un nodo sensor inalámbrico (compacto, simple y de bajo costo) que mide periódicamente la intensidad de luz en un área específica y transmite su valor de forma inalámbrica. Con N nodos se puede crear una red inalámbrica de sensores para monitoreo y control autónomo de iluminación en diversas áreas de aplicación.

Palabras clave: Sensor resistivo LDR, Nodo sensor inalámbrico, Luxómetro, Iluminación.

Introducción

La iluminación se define como la magnitud que expresa el flujo luminoso que incide sobre un área o superficie, su unidad en el sistema internacional es el lux (Enríquez, 2005; Mark, 2000). Existen normas que establecen valores mínimos de iluminación para distintas áreas de trabajo, estudio, vialidades, esparcimiento, estacionamientos, y entidades tales como maquiladoras, hospitales y laboratorios (NOM-025-STPS-2008; NOM-013-ENER-2013). Una iluminación adecuada ayuda a prevenir accidentes, reducir problemas de

salud, mejorar el rendimiento laboral y la concentración.

Un luxómetro es un instrumento utilizado para medir el nivel de iluminación que incide en un punto específico. Para saber si se cumple con los niveles mínimos de iluminación requeridos por las normativas vigentes, en los centros laborales habitualmente la iluminación se mide de forma manual con un luxómetro portátil.

Los sistemas actuales que implementan un luxómetro digital típicamente utilizan

técnicas de acondicionamiento clásico que incluyen convertidor de corriente a voltaje, amplificador de voltaje y convertidor analógico a digital (Leon, 2007; Vega, 2012). Lo cual implica alto costo y alto consumo de energía sobre todo para aplicaciones a gran escala como en las redes inalámbricas de sensores. Por otro lado, existen soluciones donde la iluminación se convierte directamente en una señal digital de frecuencia variable, a esto se le conoce como sistemas casi-digitales (Dhananjaya, 1998), ya que la frecuencia puede ser digitalizada directamente con un microcontrolador.

Un luxómetro digital inalámbrico, que mida periódicamente la iluminación en un área específica y la transmita de forma inalámbrica hacia una unidad de gestión, es útil para implementar redes inalámbricas de luxómetros para el monitoreo, registro, gestión y control de iluminación. Así, las empresas, hospitales, instituciones educativas, centros de investigación, maquinado y ensamble, alumbrado público en general, entre otros, podrán establecer un plan de mantenimiento y cumplir con las normativas de iluminación. Además de ayudar a cumplir con las normas vigentes de iluminación, con un luxómetro digital se podrían tener los siguientes beneficios: mejorar el rendimiento y concentración de los empleados, estudiantes e investigadores,

así como también preservar su salud visual y reducir el índice de accidentes laborales y viales por una iluminación inadecuada. Así como también contribuir al ahorro de energía y hacer un uso eficiente de este recurso.

Las características que debe cumplir un luxómetro para ser utilizado en redes inalámbricas de sensores deben ser las de un nodo sensor inalámbrico. Es decir, debe ser compacto, bajo costo, bajo consumo de energía, alimentado a baterías y contar con una interfaz de comunicación inalámbrica. Este artículo presenta el diseño y la implementación de un nodo sensor inalámbrico (luxómetro digital inalámbrico) que mide periódicamente la intensidad de luz en un área específica y transmite su valor de forma inalámbrica hacia una unidad de gestión. Éste se implementó con un sensor resistivo LDR, un método de linealización por hardware, un circuito de interfaz directa de acondicionamiento de señal y un transceptor XBee S1. Con N nodos se puede crear una red inalámbrica de sensores para monitoreo y control de iluminación. La metodología propuesta puede servir como alternativa en el diseño de sistemas de medida inalámbricos en otras áreas de aplicación. Por ejemplo para medir temperatura, humedad, aceleración, presión, es decir, para sensores resistivos en general.

Materiales y Métodos

Arquitectura del sistema

La figura 1 muestra un diagrama a bloques del nodo sensor inalámbrico (luxómetro digital inalámbrico) propuesto. El sistema consta de una foto-resistencia LDR (sensor para medir iluminación) en paralelo con una resistencia de $100\ \Omega$ para linealizar su respuesta, así la iluminación se convierte en un cambio de resistencia (a). El USTI (*Universal Sensors and Transducers Interface*) es el dispositivo encargado de

medir y digitalizar la resistencia equivalente a la iluminación y enviar su valor hacia el transceptor inalámbrico XBee vía RS-232 (b). El XBee envía la información hacia la unidad de gestión (c). Finalmente, el receptor XBee conectado vía USB a la computadora recibe la información y la procesa a través de un programa implementado en LabVIEW® que es la interfaz de usuario (d).

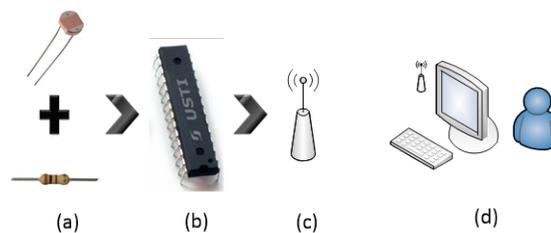


Figura 1. Diagrama a bloques del luxómetro digital inalámbrico propuesto.

Caracterización del sensor LDR

La LDR tiene la propiedad de variar su resistencia en función de la cantidad de iluminación que incide sobre su superficie, cuanto mayor sea el nivel de iluminación incidente menor es su resistencia y viceversa. En la oscuridad, normalmente la LDR tiene un valor de resistencia muy elevado (del orden de los mega-ohms), y en presencia de luz su valor puede ser de centenas de ohms. La relación entre la resistencia R de un fotoconductor y la iluminación E (densidad superficial de energía recibida expresada en lux), es

fuertemente no lineal. Un modelo simple es (Pallàs, 2001):

$$R_x = A E^{-z} \quad (1)$$

donde A y z dependen del material y las condiciones de fabricación. Para el SCd por ejemplo se tiene $0.7 < z < 0.9$. Son sensibles también a la temperatura, que afecta su sensibilidad a la radiación incidente en un grado tanto más alto cuanto menor sea la iluminación. La temperatura también es causa del denominado ruido térmico que se manifiesta como fluctuaciones de corriente cuando se aplica una tensión a la fotorresistencia para poder medir su valor. Tal como ocurre en los circuitos de acondicionamiento de señal

basados en amplitud de voltaje o corriente.

En este trabajo se utilizó una LDR una NORPS-12 del fabricante Silonex. La NORPS-12 es una célula fotoconductora SCd encapsulada en un revestimiento resistente a la humedad y dentro de una carcasa de plástico, su respuesta espectral va de los 400 a los 800 nm.

Para caracterizar la respuesta del sensor a distintos niveles de iluminación se construyó una caja de madera, de

22 x 27 x 32 cm, a la cual se le incorporó un foco de 100 Watts y un sistema para variar la iluminación. Cada valor de resistencia se midió con un multímetro digital MUL-040, el valor de iluminación se midió con un luxómetro comercial TENMA 72-7250. Se colocó el luxómetro y el sensor LDR dentro de la caja, de manera que, al variar la intensidad de luz se pudiera medir el valor correspondiente de resistencia e iluminación de forma simultánea (figura 2).

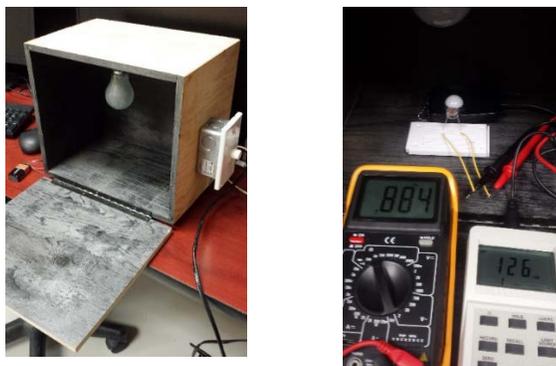


Figura 2. Caracterización de la LDR NORPS-12.

La iluminación se varió en un rango de 1 lux hasta 1000 lux, en pasos de 5 lux y 50 lux. La figura 3 muestra la relación resistencia-iluminación obtenida, se observa que la relación es fuertemente no-lineal, el modelo más simple obtenido para este sensor es:

$$R_x = 57992 E^{-0.777} \quad (2)$$

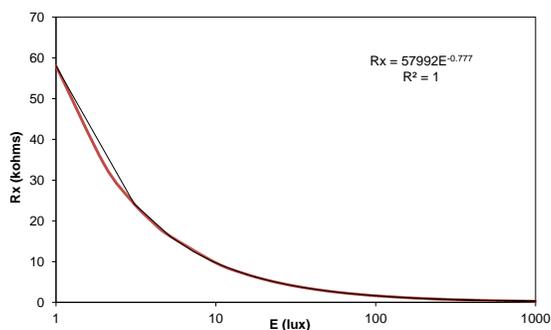


Figura 3. Relación resistencia vs iluminación obtenida experimentalmente durante la caracterización del sensor LDR NORPS-12.

La ecuación (2) cumple con las predicciones teóricas, ecuación (1). Derivando (1) con respecto a E y dividiendo por R_x , la sensibilidad relativa es

$$\frac{\frac{dR_x}{R_x}}{dE} = \frac{-z}{E} \quad (3)$$

la cual no es constante pues varía con iluminación aplicada.

Linealización del sensor LDR

En algunos casos se pretende utilizar un sensor resistivo (LDR) como un sensor linealizado a base de colocar una resistencia R en paralelo. La cual puede ser elegida de modo que en el margen de la magnitud, en este caso refiriéndonos a iluminación, de interés se tenga una buena linealidad o un error de linealidad aceptable. Para obtener

una respuesta lineal de resistencia e iluminación se colocó una resistencia en paralelo a la LDR. El método analítico que fue utilizado en este trabajo consistió en forzar tres puntos de paso en la curva de resistencia-iluminación resultante, el cual es típicamente utilizado para linealizar termistores (Pallàs, 2001), el paralelo de las dos resistencias es:

$$R_t = \frac{RR_x}{R + R_x} \quad (4)$$

la sensibilidad relativa es:

$$\frac{\frac{dR_t}{R_t}}{dE} = \frac{-R}{(R + R_x)E} \frac{z}{R_x} \quad (5)$$

Así la mejora de linealidad se obtiene a cambio de perder sensibilidad. Al aumentar R , la sensibilidad aumenta pero la linealidad disminuye y, por lo tanto, R debe ser elegida para mejorar la linealidad en un margen limitado de iluminación. Un método

analítico para estimar el valor de R es hacer que tres puntos equidistantes de la curva de respuesta resistencia-iluminación coincidan con una línea recta (Pallàs, 2001). Si se consideran tres valores equidistantes $E_1 - E_2 = E_2 - E_3$, la condición es:

$$\frac{RR_{E1}}{R + R_{E1}} - \frac{RR_{E2}}{R + R_{E2}} = \frac{RR_{E2}}{R + R_{E2}} - \frac{RR_{E3}}{R + R_{E3}} \quad (6)$$

Así, la resistencia R a colocar en paralelo con la LDR es:

$$R = \frac{R_{E2}(R_{E1} + R_{E3}) - 2R_{E1}R_{E3}}{R_{E1} + R_{E3} - 2R_{E2}} \quad (7)$$

La ecuación (7) no depende de ningún modelo matemático para R_x , así que este método puede ser aplicado a otro tipo de sensores resistivos cuya respuesta sea no-lineal, incluso cuando no se conozca explícitamente la función de transferencia del sensor.

Los puntos de ajuste utilizados son: (1 lux, 57992 Ω), (500 lux, 463.73 Ω), (1000 lux, 270.63 Ω). Lo cual da como resultado una resistencia de 76.21 Ω , y se

decidió utilizar una resistencia de 100 Ω (1% de tolerancia) en su lugar. La figura 4 muestra la relación de iluminación y resistencia R_t (LDR en paralelo con la resistencia de 100 Ω). Se observa que se gana linealidad a costa de perder sensibilidad. El comportamiento observado es cuadrático, con un coeficiente de correlación de 0.9969, la ecuación obtenida es:

$$R_t = 2 \times 10^{-5} \times E^2 - 0.428 \times E + 98.87 \quad (8)$$

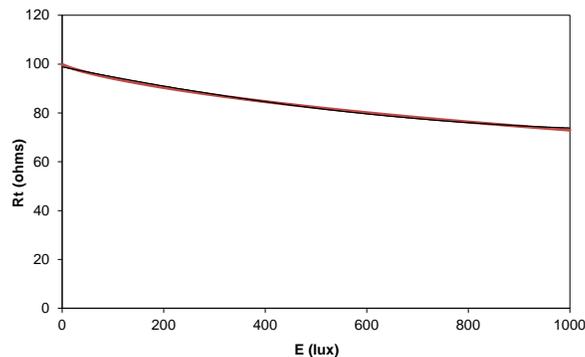


Figura 4. Relación resistencia vs iluminación obtenida experimentalmente durante la caracterización del sensor LDR NORPS-12 y la resistencia en paralelo.

Acondicionamiento de señal

La forma típica para conectar un sensor resistivo hacia un microcontrolador consiste en la digitalización de tensiones o corrientes

análogas obtenidas al amplificar la tensión o corriente de circuitos donde se incluyen los sensores, es decir, interfaces basadas en amplitud de tensión o corriente. En este tipo

de interfaces el sensor convierte la variable de interés (física o química) en una señal eléctrica; la etapa de acondicionamiento de señal, adapta márgenes y niveles de la señal (amplificación, desplazamiento de nivel, etc.) hacia un convertidor analógico; y la etapa de procesamiento analógico de señal realiza funciones de filtrado, linealización, desmodulación, etc.; y, la etapa de conversión analógica digital que puede estar o no embebida en el microcontrolador (Pallàs, 2001). Estos circuitos de acondicionamiento (con amplificadores, filtros, convertidores analógicos a digital, etc.), son soluciones relativamente complejas, de alto costo, consumo de energía y espacio. Sobre todo en aplicaciones a gran escala como las redes inalámbricas de sensores.

El USTI (*Universal Sensors and Transducers Interface*) es un circuito integrado de acondicionamiento de señal para diversos tipos de sensores (Sergey, 2011). Así, un sensor resistivo se puede conectar directamente al USTI, sin ningún componente electrónico activo, y obtener

así un sistema de medida compacto, simple y de bajo costo.

En este trabajo se utilizó el USTI para medir y digitalizar la resistencia equivalente a la iluminación R_t y enviar su valor hacia el módulo XBee vía RS-232 a través de los pines RXD y TXD, en la figura 5 se muestra el diagrama de conexiones que se implementó. Los valores de C , R_c y R_o fueron calculados según se especifica en (Sergey, 2011). R_c debe ser menor que R_t , se eligió de 100Ω . El capacitor fue de $20 \mu\text{F}$. R_o de 390Ω , todas las resistencias utilizadas son de precisión (1% de tolerancia).

El USTI se configuró para medir resistencia a través de un programa implementado en LabVIEW y conectado al USTI vía RS-232. Los comandos de configuración son M10, E100 y W1B: M10 establece el modo de medición de una resistencia; E100 especifica el valor de la resistencia de calibración $R_c = 100 \Omega$; y, W1B establece un tiempo de carga de 100 ms. (Sergey, 2011; USTI Data Sheet). La configuración RS-232 fue: 2400 baudios, no paridad y un bit de stop.

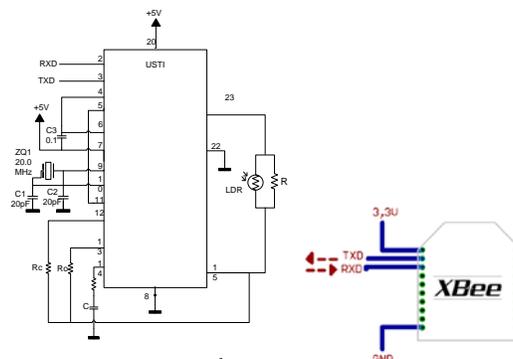


Figura 5. Diagrama de conexiones del USTI y el transceptor XBee S1

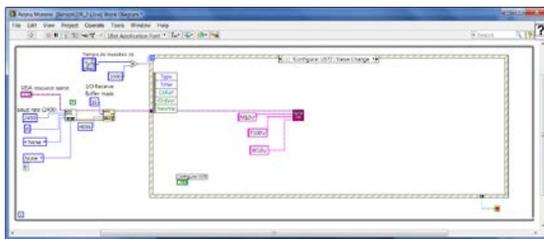
Interfaz de comunicación

La comunicación inalámbrica se implementó con dos transceptores XBee S1, uno conectado al USTI vía RS-232 y el otro conectado a la computadora, ambos se configuraron para establecer una comunicación punto a punto siguiendo el procedimiento indicado en la hoja de datos del fabricante (XBee S1 DataSheet) y el software libre X-CTU mediante el envío de comandos AT. Para que exista comunicación entre dos módulos, es necesario que tengan direcciones DL y MY encontradas, es decir, si el router se le asigna un comando DL = 0 y MY = 1, el coordinador necesitará tener los comandos DL = 1 y MY = 0. Además, deberán de

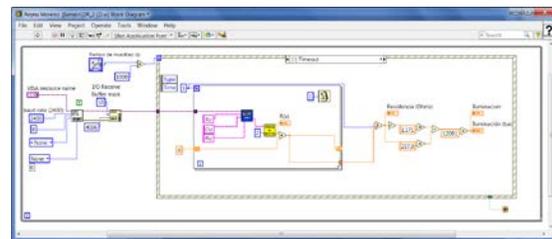
tener el mismo identificador de red PAN ID y canal CH.

Interfaz de usuario

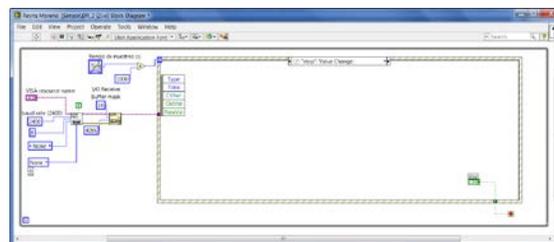
La interfaz del usuario se implementó en LabVIEW utilizando una arquitectura de programación basada en eventos. El primer evento ocurre cuando el usuario presiona el botón “Configurar USTI” (figura 6a). El evento timeout (figura 6b) ocurre cada vez que transcurre el tiempo de muestreo elegido por el usuario, este evento realiza el promedio de 5 lecturas de R_t e implementa la ecuación (8) para convertir la resistencia en iluminación, la cual se muestra en la gráfica y los indicadores numéricos del panel frontal. Al presionar el botón “Detener” se detiene la ejecución del programa (figura 6c).



(a)



(b)



(c)

Figura 6. Código de la interfaz de usuario

Resultados

La figura 7 muestra la interfaz de usuario que se implementó para registrar y visualizar los valores de iluminación que envía el nodo sensor. Con ello, se puede llevar un historial del registro de iluminación y establecer el periodo de cada lectura.

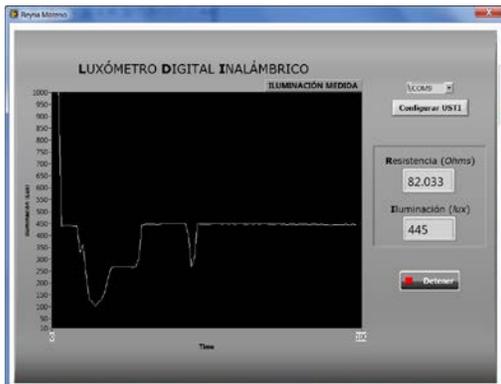


Figura 7. Interfaz de usuario que representa la unidad de gestión.

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos al medir la R_t con el multímetro y el sistema propuesto para diferentes niveles de iluminación. Se calculó el error relativo, tomando como valor esperado la R_t medida con el multímetro y como valor medido la R_t obtenida con el sistema. Se obtuvo un error máximo de 2.1 %, lo cual demuestra que el sistema implementado es capaz de medir resistencia con un error inferior al 2.1 %. También se muestra el nivel de iluminación y su error relativo, como se observa el sistema propuesto es capaz de medir iluminación con un error relativo inferior al 6 %. La figura 8 muestra el prototipo del sistema durante la realización de las medidas.

E (lux) TENMA 72-7250	R_t (multímetro)	R_t (Sistema)	Error (%)	E (lux) (Sistema)	Error (%)
50	96.2	95.07	1.2	49.5	1.0
100	93.9	92.6	1.4	94.2	5.8
150	91.7	90.206	1.6	151.2	0.8
200	89.9	88.9	1.1	187.9	6.0
250	88.3	87.24	1.2	240.4	3.8
300	86.8	85.67	1.3	296.0	1.3
350	85.5	84.23	1.5	352.0	0.7
400	84.3	82.92	1.6	407.2	1.8
450	83.2	81.9	1.6	452.9	0.7
500	82	80.6	1.7	514.8	3.0
550	81.1	79.8	1.6	554.8	0.9
600	80.1	78.86	1.5	603.8	0.6
650	79.3	77.71	2.0	666.5	2.5
700	78.3	76.9	1.8	712.5	1.8
750	77.6	76.3	1.7	747.6	0.3
800	76.8	75.27	2.0	809.8	1.2
850	76.2	74.75	1.9	842.1	0.9
900	75.4	73.9	2.0	896.4	0.4
950	74.8	73.23	2.1	940.3	1.0
1000	74.1	72.55	2.1	986.0	1.4

Tabla 1. Resultados experimentales de la caracterización del sistema implementado.

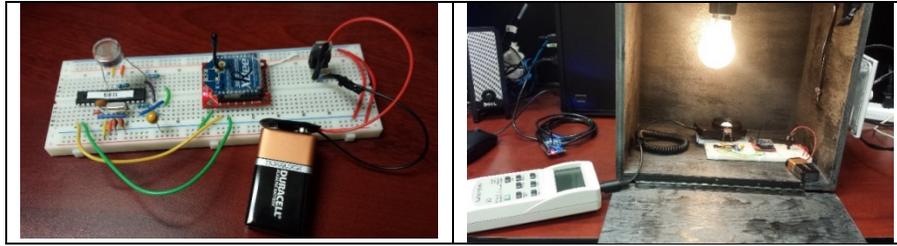


Figura 8. Prototipo final durante las pruebas de funcionalidad.

Conclusiones

Es posible implementar un luxómetro digital inalámbrico (nodo sensor inalámbrico para medir iluminación) compacto, de fácil instalación, bajo costo, bajo consumo de energía que las soluciones actuales. El sistema propuesto sirve para implementar una red cableada o inalámbrica de luxómetros como parte integral en la infraestructura de un sistema automatizado de monitoreo y control de iluminación. En general, la metodología propuesta sirve para diseñar sistemas de medida autónomos o inteligentes en distintas áreas de aplicación. Por ejemplo: automatización industrial, medidores remotos (agua, luz, gas), domótica, automoción, sistemas de vigilancia, etc.

Referencias

Dhananjaya B.M.,1998, “*Light meter*”, application note DS40160A/3_015 Microchip technology.

Enríquez Harper Gilberto,2005, “*Manual práctico del alumbrado*”, Limusa-Noriega, Mexico (2005).

Leon Arroba Adrián Luis, 2007, “*Construcción de un luxómetro digital*”, Tesis para obtener el título de Tecnólogo en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Peru.

Mark Stanley Rea, 2000, “*The IESNA lighting handbook: reference & application*”, 9th ed. Illuminating Engineering Society of North America in New York, NY , ISBN: 0879951508.

NORMA Oficial Mexicana, NOM-025-STPS-2008, “*Condiciones de iluminación en los centros de trabajo*”,

<http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/Nom-025.pdf>, Jul-2014

NORMA Oficial Mexicana, NOM-013-ENER-2013, “*Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en vialidades*”

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5302568&fecha=14/06/2013, Jul-2014

Pallàs-Areny, R.; Webster, J. G., 2001, “*Sensors and Signal Conditioning*”, 2nd ed.; John Wiley & Sons: New York, USA, ISBN: 0-471-33232-1.

Sergey Yurish Y., 2011, “*Digital Sensors and Sensor Systems: Practical Design*”, IFSA International Frequency Sensor Association Publishing, ISBN: 978-84-615-6957-1.

Vega Pérez José Adán, 2012, “*Control automático de iluminación de un recinto*”, Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, Mexico D.F.