



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN - MANAGUA

**FACULTAD REGIONAL MULTIDISCIPLINARIA DE CHONTALES**  
**“CORNELIO SILVA ARGÜELLO”**  
**FAREM – CHONTALES**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN MATEMATICAS APLICADAS**

**Tesis para optar al grado de Doctor en Matemática Aplicada**

**Evaluar las medidas de rendimiento óptimos de los semáforos ubicados en los alrededores de las rotondas Centroamérica y Jean Paul Genie, para calcular un ciclo común que permitan agilizar la circulación y mejorar la operatividad entre ellas.**

**Autor: M. Sc. Carlos Alberto Mendoza Galán**

**Tutora: M. Sc. PD. María del Carmen Chávez Cárdenas**

**Noviembre, 2017**

Santa Clara, 12 de noviembre del 2017

A comisión

**DOCTORADO EN MATEMATICA APLICADA**

Su despacho.

Reciban un caluroso saludo de mi parte. Me dirijo a ustedes como tutora del estudiante de doctorado **Carlos Alberto Mendoza Galán** quien es autor de la tesis de investigación titulada: ***Evaluar las medidas de rendimiento óptimos de los semáforos ubicados en los alrededores de las rotondas Centroamérica y Jean Paul Genie, para calcular un ciclo común que permitan agilizar la circulación y mejorar la operatividad entre ellas***, el cual permitirá optar al doctorado en **Matemática Aplicada**.

Después de hacer las valoraciones necesarias tengo a bien manifestar que el doctorando **Mendoza Galán** ha cumplido con los requisitos para poder defender su trabajo de investigación en la fecha propuesta para tal efecto.

Agradecida de su atención me suscribo deseándole éxitos en sus funciones académicas.

Atentamente,



Lic. María del Carmen Chávez Cárdenas, PhD<sup>1</sup>

Docente del Departamento de Computación

Facultad de Matemática, Física y Computación

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba

C/c archivo

---

<sup>1</sup> La carta fue enviada por correo electrónico el día 13 de noviembre del 2017

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a la memoria de mis padres Juana Antonia Galán (q.e.p.d) y Carlos Mendoza Telles (q.e.p.d) y a toda mi familia, en especial a todos mis hijos.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios, por brindarme la lucidez y fortaleza para culminar ésta empresa, de manera muy especial a mi tutora la doctora María del Carmen Chávez Cárdenas que me ha acompañado durante este periodo de preparación.

Agradezco profundamente a todos los que de una u otra manera influyeron en la conclusión de este trabajo, a todos ellos mi consideración y aprecio.

Agradezco de manera especial al doctor Antonio Parajón Guevara por sus valiosas sugerencias y por mantener vivo el programa de doctorado. También agradezco al licenciado Eleskier Sánchez quien me apoyó en la parte de programación y al ingeniero Genaro Guillén Morales quien me recomendó al señor Sánchez y me ayudó a coordinar algunas visitas con el ingeniero Gilberto Solís en Tránsito Nacional.

## RESUMEN

El método Webster es un enfoque tradicional que se utiliza para lograr un control adecuado en las intersecciones donde se necesita una regulación por medio de semáforo. Esta metodología, utiliza los flujos de saturación en cada fase del mismo, para determinar un ciclo mínimo de funcionamiento. Para lograr esto en Managua, la alcaldía realiza aforos vehiculares mensuales, antes manuales ahora computarizados al instalar semáforos inteligentes, y luego la Policía Nacional se encarga de revisar y diseñar la infraestructura vial adecuada, estableciendo los ciclos adecuados para el lugar en conflicto.

Los ciclos de los semáforos son tiempos enteros en segundos y constantes, por esta razón su funcionalidad se vuelve determinístico, es decir, a través de un modelo matemático de Programación Lineal Entera (PLE) se puede establecer la óptima relación entre dos de ellos en términos de sus coincidencias, se ha comprobado en un estudio previo que el mayor número de ellas ocurre cuando el *Máximo Común Divisor* los ciclos es *máximo*, hay estudios recientes que respaldan estos resultados.

En esta investigación se revisaron los ciclos de los cinco semáforos instalados alrededor de las rotondas, Centroamérica y Jean Paul Genie, para proponer un funcionamiento como semáforos con un ciclo común entre ellas, aplicando los resultados anteriores con el fin de agilizar el congestionamiento vehicular en este lugar considerado como punto crítico.

Para lograr este propósito se determinó los tiempos de los ciclos óptimos de los semáforos estudiados dos a dos, luego a través de un modelo matemático de PLE se evaluó la mejor relación, después se diseñó un esquema de simulación en el WinQSB para evaluar el funcionamiento del modelo de redes que involucra a las dos rotondas en términos de maximizar el tiempo entre sus ciclos.

Palabras claves: Fases del semáforo, Método Webster, Flujo de saturación, Ciclo de un semáforo, Coincidencias, Rotondas, Simulación.

## ABSTRACT

The Webster method is a traditional approach that is used to achieve adequate control at intersections where regulation by means of a traffic light is needed. This methodology uses the saturation flows in each phase of the same, to determine a minimum operating cycle. To achieve this in Managua, the mayor's office performs monthly vehicle loads, before manuals now computerized by installing smart traffic lights, and then the National Police is responsible for reviewing and designing the appropriate road infrastructure, establishing the appropriate cycles for the place in conflict.

The cycles of the semaphores are whole times in seconds and constant, for this reason their functionality becomes deterministic, that is, through a mathematical model of Integer Linear Programming (PLE) you can establish the optimal relationship between two of them in terms of its coincidences, it has been proven in a previous study that the greater number of them occurs when the Maximum Common Divider cycles is maximum, there are recent studies that support these results.

In this investigation, the cycles of the five traffic lights installed around the roundabouts, Central America and Jean Paul Genie, were reviewed to propose a functioning as traffic lights with a common cycle between them, applying the previous results in order to speed up the vehicular congestion in this place considered a critical point.

To achieve this purpose, the optimal cycle times of the semaphores studied two to two were determined, then through a mathematical model of PLE the best relationship was evaluated, then a simulation scheme was designed in the WinQSB to evaluate the operation of the network model that involves the two roundabouts in terms of maximizing the time between their cycles.

Keywords: Semaphore phases, Webster Method, Saturation Flow, Traffic Light Cycle, Matches, Roundabouts, Simulation.

### **Breve descripción del autor**

MONOGRAFIA PARA EL GRADO DE LICENCIADO: "Teoremas de Sobreyectividad para Mapas  $\alpha$ - expansivo bajo ciertas condiciones de frontera." UNAN-Managua, febrero, 1989.

ESPECIALIDAD EN METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION: "Análisis del impacto del Postgrado en la UNAN-Managua" UNAN- Managua y Universidad de Barcelona España, Mayo-Octubre, 1993.

MAESTRIA: Metodología de Investigación Educativa. "Relación entre las áreas temáticas de las investigaciones estudiantiles con la curricula de las carreras en la Facultad de Ciencias." UNAN- Managua y Universidad de Barcelona España, junio 1997.

DESS: Estadísticas para la empresa. "Análisis estadístico de la basura en París. Rennes II, Francia, septiembre 2000"

MAESTRIA: Matemática Aplicada. Relacionar las medidas de rendimiento y los tiempos óptimos de los ciclos de dos semáforos, Galerías y Club Terraza, para obtener un mejor funcionamiento entre ellos, febrero-2017.

### **Eventos internacionales en los que ha participado**

2012: "Revisión de los parámetros óptimos de funcionamiento de los semáforos de Rubenia y Villa Fontana (ENITEL), 2003-2010." UCR, San José Costa Rica. SIMMAC XVI y XVIII

### **Experiencia Laboral**

1985-2017: Docente Universitario

1991-1993: Jefe de Departamento de Matemáticas y Estadísticas. Facultad de Ciencias. UNAN-Managua

1993-1998: Vice-Decano de la Facultad de Ciencias. UNAN-Managua

2007- 2010: Secretario Facultativo de la Facultad de Ciencias de la UNAN-Managua

## INDICE

I.	INTRODUCCIÓN .....	1
II.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	8
III.	ANTECEDENTES .....	12
IV.	JUSTIFICACIÓN .....	19
V.	OBJETIVOS .....	25
	5.1 Objetivo General.....	25
	5.2 Objetivos Específicos.....	25
VI.	MARCO TEORICO.....	26
	6.1 Perspectiva teórica .....	26
	6.1.1 Flujo de saturación y tiempo perdido .....	28
	6.1.2 Cálculo del ciclo óptimo .....	31
	a) MÉTODO WEBSTER.....	31
	b) MODELO AMERICANO.....	32
	c) MÉTODO SIMULTÁNEO (ALLSOP).....	32
	d) MODELO SECUENCIAL (AKCELIK) .....	32
	6.1.3 Diagrama espacio-tiempo.....	39
	6.2 Marco teórico .....	41
	6.2.1 Semáforos .....	41
	6.2.2 Ventajas y desventajas de los semáforos.....	42
	6.2.3 Semáforos de tiempo fijo .....	43
	6.2.4 Relación de los verdes efectivos por fases en dos semáforos. ....	44
	6.2.5 Elementos geométricos básicos de una rotonda .....	48
	6.2.6 Tráfico.....	52
	6.2.7 Congestión vehicular .....	52
	6.2.8 Explicación teórica del congestionamiento .....	53
	6.2.9 Causas de la congestión.....	53
	6.2.10 El problema es creado principalmente por los automóviles .....	54
	6.2.11 Accidentes automovilísticos .....	56
VII.	HIPOTESIS .....	63
VIII.	DISEÑO METODOLOGICO .....	66



8.1 Construcción del Modelo Matemático propuesto para revisar dos semáforos .....	69
8.2 Simulación por el programa WinQSB del óptimo encontrado.....	71
8.3 Ciclos propuestos para las rotondas Jean Paul Genie y Centroamérica .....	72
IX. RESULTADOS .....	76
X. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	84
XI. CONCLUSIONES.....	91
XII. RECOMENDACIONES .....	93
XIII. BIBLIOGRAFÍA.....	94
XIV. ANEXOS .....	97
Anexo 1: Uso del software WinQSB.....	97
Anexo 2: Manual Mac 1.0.4 .....	100

## I. INTRODUCCIÓN

Managua es un área urbana típica en América Latina, con un crecimiento demográfico sustancial, un sistema de transporte público desordenado, y un aumento rápido en los automóviles privados (Mendoza Orozco, 2013).

Según estadísticas de la Dirección Nacional de Tránsito de la Policía Nacional y de la Alcaldía de Managua, desde 2007 a la fecha, el parque vehicular nacional creció de 339,610 unidades a aproximadamente 800,000 vehículos en todo el país (Ver Figura 1). En 2007 circulaban aproximadamente 250,000 vehículos por la capital. Diez años después, en el mismo espacio físico, pero con 8,517 calles revestidas y nuevas, la cantidad de carros que circula a diario es de aproximadamente 500,000 según estimaciones oficiales del Ministerio de Transporte e Infraestructura y Alcaldía (Silva & Moncada, 2017).



Figura 1: Causas posibles de los embotellamientos según registros vehiculares en los últimos diez años.



Actualmente en Managua existen semáforos en 153 intersecciones, 52 de estas con dispositivos inteligentes que fueron instalados en 2015, cuando la municipalidad inició el proyecto de reemplazo de los dispositivos análogos por digitales.<sup>2</sup> La meta es que para 2018 en la capital existan 98 intersecciones con reguladores de tráfico digital, según el proyecto presentado por la municipalidad (Lara, 2017).

El procedimiento que se utiliza en Managua para lograr un control adecuado en las intersecciones donde se necesita una regulación por medio de semáforo, es el método de Webster (Cal y Mayor & Cárdenas, 2007), es decir que por medio de las herramientas de la Ingeniería de Tránsito se realiza lo siguiente: Primero se evalúa el nivel de servicio de cada uno de los grupos de carriles, accesos e intersección en general; convirtiendo los volúmenes horarios dados en tasas de flujos utilizando el factor de la hora de máxima demanda (FHMD) y calculando el tráfico de saturación establecidos por grupos de carriles asociados con las tasas de flujos y la proporción de giros.

Luego se realiza un análisis de capacidad para cada grupo de carriles, el grado de saturación crítico, así como también el cálculo del nivel de servicio para los accesos y para toda la intersección para determinar el ciclo adecuado que realiza las demoras mínimas.

Para realizar este procedimiento la Alcaldía de Managua realiza aforos vehiculares, antes manuales ahora computarizados con la instalación de los semáforos inteligentes en 52 intersecciones conflictivas, a partir de estos datos la Policía Nacional es la encargada instalar la estructura vial adecuada para cada situación requerida, pero de forma aislada.

---

## **2 Plan Maestro para el Desarrollo Urbano de Managua.**

---

Muy poco se ha encontrado en la literatura acerca de encontrar relaciones entre los tiempos de los semáforos. “La determinación del tiempo de ciclo óptimo para una red de semáforos coordinados, es un problema para el que no se dispone aún de una formulación analítica” (Barrientos Ruiz & Fernández Koprach, 1989)

El enfoque tradicional se basa en la minimización de las demoras a los vehículos de los movimientos críticos, basadas en (Webster, 1958). No obstante, existen algunas objeciones al criterio de minimización de demoras a los vehículos que pueden plantearse. La primera en relación con la no-consideración de las demoras a los usuarios, sólo de los vehículos.

Otra objeción en relación con el consumo de combustible y que se relaciona con el número de detenciones. Estas están también relacionadas con los accidentes, especialmente con los choques por detrás. Luego, una función compuesta de demoras y detenciones propuesta por Akcelik en su modelo *SECUENCIAL* (Gómez Restrepo, 2005).

Por otro lado, el problema de relacionar dos o más semáforos como lo menciona Fernández (2014), “no ha sido planteado analíticamente ya que es de extraordinaria complejidad matemática” (Fernández Aguilera, 2014).

Cabe citar aquí a Lazo, Leonardo y Sánchez, Gilberto (1981), donde mencionan que “generalmente todos los semáforos dentro de un mismo sistema deberán tener igual longitud. Sin embargo, condiciones especiales tales como la longitud ente semáforos, las velocidades que se desarrollan entre ellos, puede hacer deseable que las longitudes del ciclo en semáforos determinados sean múltiplos o submúltiplos de la longitud del ciclo predominante” (Lazo Margáin & Sánchez Ángeles, 1981).

Basados en estos estudios, en un estudio previo se logró establecer que el mejor funcionamiento entre dos semáforos, Galerías y Club Terraza, en términos del mayor número de coincidencias entre ellos (Mendoza, 2017). Para lograr este propósito se elaboró un algoritmo que a partir de dos ciclos dados construye una matriz de pares entre los tiempos de los ciclos de los semáforos estudiados encontrando su óptimo, luego a través de un modelo matemático de Programación Lineal Entera (PLE) se evaluó la funcionalidad de esta relación, seguidamente se diseñó un modelo de simulación con el software WinQSB para evaluar la efectividad de los ciclos propuestos en el modelo.

Con respecto a las rotondas, según Lazo (1985) una rotonda o glorieta es un “área donde convergen tres o más ramas y donde el tránsito se incorpora o se separa de un camino de un solo sentido; la circulación se hace en la dirección contraria a las manecillas del reloj, alrededor de un área central” (Lazo Margáin, 1985).

Pero también causan que “en vías con tráfico denso o muchas rotondas concatenadas, provoca cansancio en la conducción, ya que la incorporación y abandono de la rotonda, junto con el cambio y vigilancia de la velocidad supone un estrés adicional en el conductor” (<http://es.wikipedia.org/wiki/Rotonda>).

La ley de tránsito y seguridad vial establecen las normas como los participantes de tráfico deben utilizar la rotonda. Históricamente las primeras rotondas fueron construidas en Francia.

En Managua la construcción de las rotondas en la capital empezó como una campaña política del ex -alcalde Arnoldo Alemán.

En el diseño y construcción de las rotondas, las autoridades municipales no tomaron en cuenta el crecimiento poblacional ni el incremento vehicular nacional e internacional, por lo cual las rotondas fueron una solución “momentánea” que con el paso del tiempo se volvió un problema” (Rivera, 2008)

Las rotondas o glorietas permiten rebasar un cruce de carreteras sin necesidad de poner semáforos en todos los accesos ni parar en un stop, pero si sus flujos de tráfico no están equilibrados se producen demoras y largas filas de vehículos en algunas entradas, lo que **desespera a los conductores**. Para resolver el problema, los ingenieros suelen optar por ampliar la rotonda y su número de carriles, construir carriles de giro directo a la derecha, convertir la glorieta en una intersección semaforizada o incluso crear enlaces a distinto nivel. Sin embargo, todas estas soluciones son constructivas y a menudo no se pueden llevar a cabo por limitaciones medioambientales o presupuestarias.

Para estos casos, investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) plantean aplicar un sistema inteligente de transporte, denominado '*ramp meter*', que ya se utiliza en los accesos a algunas autovías y autopistas extranjeras para 'dosificar' el número de vehículos que se incorporan a la vía principal cuando está congestionada. Su propuesta es aplicarlo, mediante una metodología propia, en las rotondas.

Para desarrollar el estudio, publicado en la revista *Transportation Research Record*, los autores utilizaron datos reales de tráfico registrados en una rotonda de El Saler (Valencia) y técnicas de microsimulación. Después desarrollaron un modelo gráfico y una guía para que los ingenieros o gestores viales puedan implementar este sistema inteligente, que ya se utiliza en Australia y algunas glorietas norteamericanas (Martín-Gasulla, 2017).

Basado en estas experiencias, en esta investigación se aplicó la metodología que se utilizó para relacionar los semáforos de Galerías y el Club Terraza, al análisis de las rotondas Centroamérica y Jean Paul Genie, para proponer un funcionamiento como semáforos con un ciclo común entre ellas, tomando en consideración los tiempos de los ciclos de los cinco semáforos instalados sus alrededores, esto con el fin de agilizar el congestionamiento vehicular en este lugar considerado como punto crítico.

Para lograr este propósito en la zona seleccionada, se revisaron los ciclos de los cinco semáforos instalados alrededor de las rotondas dos a dos. Luego a través de un modelo matemático de PLE se evaluó la mejor relación, después se diseñó un esquema de simulación en el WinQSB para evaluar el funcionamiento del modelo de redes que involucra a las dos rotondas en términos de maximizar el tiempo entre sus ciclos.



## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los puntos críticos en la capital se ubica a la entrada sur, la cual presenta una infraestructura vial muy particular: dos rotondas cercanas, Centroamérica y Jean Paul Genie, y cinco semáforos en sus alrededores: tres de ellos, Farmacia Vida (E), Edificio Pellas (N) y La Salle (O) alrededor de la rotonda Centroamérica y dos, Galerías(O) y Las Colinas (S) alrededor de la Jean Paul Genie (Ver Figura 3).



Figura 3: Ubicación de la zona de estudio ubicada a la entrada sur de Managua.

Como se puede observar, además de los semáforos involucrados en este estudio, aparece el semáforo del Club Terraza, el cual junto con el semáforo de Galerías formó parte de una investigación previa donde se relacionaron sus ciclos de manera óptima. Parte de este estudio se presenta al inicio de los resultados, ya que son de suma importancia para establecer la posible relación entre las dos rotondas y los ciclos de los cinco semáforos cercanos. (Mendoza, 2017)

Los ciclos de los semáforos son tiempos enteros en segundos y son constantes durante el transcurso del día, por esta razón estudiar su funcionalidad se vuelve determinístico, es decir, a través de un modelo matemático de Programación Lineal Entera se puede encontrar la óptima relación entre ellos con el fin de establecer una sincronización adecuada entre ellos. La relación entre los tiempos de los ciclos  $C_1$  y  $C_2$  de dos semáforos seleccionados, se verificará por el máximo número de **coincidencias de los tiempos verdes** para cada semáforo en una fase determinada, en un periodo de tiempo supuesto como la hora de mayor demanda.

Para obtener una medida de esta relación se diseñó un *algoritmo heurístico* que determina el óptimo de todas las combinaciones posibles dentro de los rangos de dos ciclos dados. Este valor será el número entero de segundos en el cual los dos ciclos  $C_1$  y  $C_2$  tienen una primera coincidencia, lo que se requiere es que durante del periodo de máxima demanda este número de coincidencias sea máximo.

Para verificar este procedimiento se elaboró un programa según el algoritmo descrito para tal efecto. Por ejemplo, si tenemos dos ciclos, un ciclo  $C_1=75$  segundos y otro  $C_2=90$  segundos, independientemente de los tiempos verdes de cada fase, al realizar todas las combinaciones posibles  $C_i$  y  $C_j$  dentro de estos rangos (matriz de 16 por 16), se encontró estos dos ciclos están relacionados según los resultados del programa (Ver anexo 2), ya que el Mínimo  $\{MCM(C_i, C_j)\}=MCM(75,90)=450$  y el Máximo  $\{MCD(75, 90)\}=15$ , esto significa que la primera coincidencia del tiempo verde ocurrirá después de 450 segundos en una hora de máxima demanda de aproximadamente 3600 segundos, habrá aproximadamente 8 coincidencias  $(3600/450)$ .

La práctica indica que ciclos menores de 35 segundos o mayores de 120 se acomodan difícilmente a la mentalidad del usuario de la vía pública (Sánchez-Toscano Barbero, 2003), por esta razón se tratará en lo posible respetar estos

rangos, ya que ha logrado establecer por un diseño una simulación que los ciclos largos no son funcionales.

Otra variable que se consideró en el estudio previo fue el *desfase* entre los dos semáforos con ciclos  $C_1$  y  $C_2$ , pero se encontró que esto no influye de manera significativa debido a que los semáforos están muy cercanos, como esto es similar para las rotondas, para verificar su óptimo no se calculará el desfase entre ellas.

Esta metodología se propone aplicar al estudio de las rotondas Centroamérica y Jean Paul, considerando los ciclos de los cinco semáforos cercanos, estableciendo las posibles fases en las rotondas de tal manera que tengan relación con los ciclos de los semáforos considerados, esto con el objetivo de mejorar el flujo vehicular en la zona a la hora máxima demanda (Mendoza, 2017).

Cabe mencionar aquí, que actualmente la Policía Nacional está aplicando medidas de control vehicular diariamente en algunos puntos críticos que incluyen semáforos como parte de un plan de carácter coyuntural para agilizar el flujo vehicular, y uno de ellos es una de las tantas rotondas que hay en Managua: la rotonda de Metrocentro. Esto indica la necesidad de instalar semáforos en estos lugares.

Sin embargo, el ingeniero especializado en transporte, David Gaitán Fuentes como lo menciona en el periódico El Nuevo Diario (2015), los “semáforos en la rotonda Jean Paul Genie no es conveniente. Eso funciona cuando hay una red de intersecciones fluidas, calles más amplias y sincronización en los dispositivos de tráfico para descargar el volumen de tráfico, lo cual no es nuestro caso”.

Gaitán señaló que el paso a desnivel es la mejor opción, pero instalar semáforos creará mayor embotellamiento, dado que el “desagüe” vehicular es grande y hay

semáforos a poca distancia en la Centroamérica y en la misma Carretera a Masaya, pasando el paso a desnivel de la Centroamérica. (Lara, 2015)

El funcionamiento de los semáforos que ya están instalados en la rotonda Jean Paul Genie nunca se dio (Ver figura 4), aduciendo los problemas mencionados anteriormente, pero con los resultados de este estudio se logrará establecer una posible coordinación de forma adecuada, la que permitiría agilizar el congestionamiento vehicular que ocurre a la hora de mayor demanda y aprovechar la infraestructura que ya está instalada.



Figura 4: Semáforo ubicados en la rotonda Jean Paul Genie.<sup>3</sup>

Otra situación importante a mencionar son los cruces peatonales, los cuales se reducen en este tipo de intersección y dado el crecimiento comercial en la zona sería bueno establecer este tipo de señales viales para evitar accidentes.

---

<sup>3</sup> Fuente 100% noticias, 13/04/2016.

### III. ANTECEDENTES

El departamento de Matemática y Estadística de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, realizó con ayuda de estudiantes de la carrera de Matemática en el año 2003 y 2014 estudios independientes del volumen de tráfico, en cuanto a los tiempos de retardo y embotellamientos en las horas de máxima demanda del flujo vehicular en los semáforos de Villa Fontana (Enitel) e Iván Montenegro (W, D., & E., 2014) respectivamente, donde se encontraron algunas dificultades respecto al tamaño de los ciclos de los semáforos en estas intersecciones, sobre todo en las horas de máxima demanda (FHMD) u horas pico.

Para sincronizar de forma óptima los ciclos de los semáforos, se han empleado diversas técnicas matemáticas que van desde la Programación Matemática con restricciones de equilibrio (Schutter, B. y de Moor, B, 1998) útiles para la realización de análisis estratégicos del tráfico, hasta las técnicas de optimización aplicadas a modelos de simulación (Wiering, et al., 2004).

No obstante, existen otros estudios que realizaron estudiantes de la Universidad Nacional de Ingeniería: Iniciativa del ordenamiento y señalización vial de las intersecciones (Ópticas Múnkel, Palmiras y Cementerio de Granada).

Este trabajo se realizó con el fin de ayudar al ordenamiento en dicha zona, ya que el desarrollo de la actividad humana ha ocasionado una mayor demanda de transporte y circulación peatonal: Estudio de tráfico 'Intersección Villa Progreso', Cruce: Pista Sub-Urbana – Pista Camino Solo. (Ver Figura 5)

El estudio que se llevó a cabo en esta intersección, fue para dar solución a la problemática que se presentaba en Villa Progreso ya que dicha intersección es en

forma de cruz con la diferencia que se forma parte de ella, dos intersecciones secundarias.



**Figura 5: Semáforos de Villa Progreso desde Google Earth**

En el ***Estudio de las principales intersecciones semaforizadas en distrito uno y cinco*** se pretende dar posibles soluciones a los problemas en las intersecciones con altos valores de atrasos, números de paradas, filas; que provocan consecuencias negativas a los usuarios de las vías y crean problemas de fluidez vehicular resultando valores excesivos de consumo de combustible y emisión de humo, e de ahí la motivación que conllevó a realizar esta investigación.

Cabe mencionar que estos trabajos investigativos son de vital importancia para la población en general, y al ver esta problemática que a diario vemos por las avenidas de nuestra capital surge la motivación de realizar este esfuerzo investigativo.

En el año 2005 y 2008 se hicieron estudios independientes en las **Jornadas Universitaria de Desarrollo Científico** con ayuda de estudiantes de la carrera de Matemática e Ingeniería de los flujos de vehículos en el semáforo de Villa Fontana



(ENITEL) utilizando la metodología de la simulación de Líneas de espera con llegadas y tiempos probabilísticos, donde se encontraron algunas dificultades que presentan los flujos vehiculares sobre todo en las horas picos.

La Teoría de Colas es el estudio matemático del comportamiento de líneas de espera. Estas se presentan cuando "clientes" llegan a un "lugar" demandando un servicio a un "servidor" el cual tiene cierta capacidad de atención. Si el servidor no está disponible inmediatamente y el cliente decide esperar, entonces se forma en la línea de espera.

Con el objetivo de utilizar una nueva metodología para estudiar el mismo semáforo, estos datos se utilizaron para hacer un proceso de simulación de líneas de espera con los tiempos de servicio determinístico y llegadas de los vehículos siguiendo una distribución de Poisson. La metodología utilizada en este estudio permitió visualizar algunas dificultades presentes en otros semáforos sobre todo a la hora pico, estos resultados fueron publicados en el *XVIII Simposio Internacional de Métodos Matemáticos Aplicados a las Ciencias, 2012 (SIMMAC)* (Mendoza & Marín, 2012).

Entre los principales resultados encontrados se tiene que los tiempos en cada ciclo del semáforo no incluyen los tiempos peatonales, lo cual es un gran riesgo para la población en general por otro lado los ciclos a veces no son los adecuados, como se comprobó en este estudio. Además, se quiere dar a conocer el trabajo investigativo que se realiza en nuestra universidad en las Jornadas de Desarrollo Científico Estudiantil y los Congresos Científicos para resolver situaciones de la realidad nacional con modelos matemáticos sencillos y sobre todo llamar la atención a las instituciones para acercarse a la universidad y así lograr un mejor desarrollo de su actividad práctica.

Es por esta razón que esta investigación podría aportar mucho a resolver situaciones reales en Managua, ya que la alcaldía tiene bases de datos actuales y junto con ingeniería de tránsito de la Policía Nacional se pueden hacer coordinaciones para la evaluación de un semáforo antes de instalarlo o no. Es importante señalar que antes de seleccionar y poner a funcionar un semáforo, se debe efectuar un estudio con todos los parámetros necesarios, para garantizar que éste responda a las necesidades del tránsito que existe en el lugar.

La idea de estudiar los tiempos de los ciclos de dos semáforos es para ampliar estos conocimientos para revisar los semáforos que están actualmente en serie para lograr la coincidencia de los tiempos verdes en un mayor porcentaje durante la hora de máxima demanda. Por otro lado, se ha logrado encontrar empíricamente que cuando los tiempos de los ciclos son múltiplos de un número determinando la coincidencia de los ciclos aumenta, esto se logró verificar en una investigación que relacionó de manera óptima los semáforos de Galerías y el Club Terraza (Mendoza, 2017).

El problema de relacionar dos o más semáforos como lo menciona Fernández (2014), "no ha sido planteado analíticamente ya que es de extraordinaria complejidad matemática" (Fernández Aguilera, 2014).

Cabe citar aquí a Lazo, Leonardo y Sánchez, Gilberto (1981), donde mencionan que "generalmente todos los semáforos dentro de un mismo sistema deberán tener igual longitud. Sin embargo, condiciones especiales tales como la longitud ente semáforos, las velocidades que se desarrollan entre ellos, puede hacer deseable que las longitudes del ciclo en semáforos determinados sean múltiplos o submúltiplos de la longitud del ciclo predominante" (Lazo Margáin & Sánchez Ángeles, 1981).



El enfoque tradicional se basa en la minimización de las demoras a los vehículos de los movimientos críticos, basadas en (Webster F. V., 1958). No obstante, existen algunas objeciones al criterio de minimización de demoras a los vehículos que pueden plantearse.

La primera en relación con la no-consideración de las demoras a los usuarios, sólo de los vehículos. Otra objeción en relación con el consumo de combustible y que se relaciona con el número de detenciones. Estas están también relacionadas con los accidentes, especialmente con los choques por detrás. Luego, una función compuesta de demoras y detenciones propuesta por Akcelik en su modelo *SECUENCIAL* (Gómez Restrepo, 2005).

Muy poco se ha encontrado en la literatura acerca de encontrar relaciones entre los tiempos de los semáforos. “La determinación del tiempo de ciclo óptimo para una red de semáforos coordinados, es un problema para el que no se dispone aún de una formulación analítica” (Barrientos Ruiz & Fernández Koprach, 1989)

Usualmente se utilizan dos métodos que permiten abordar dicho propósito. Estos son:

- i. Elección automática del tiempo del ciclo realizada por TRANSYT. Este primer método corresponde a una opción incorporada al programa computacional TRANSYT para seleccionar u orientar al usuario en la determinación del tiempo de ciclo óptimo para una red coordinada. Una descripción detallada de este proceso se puede encontrar en Robertson (1969).
- ii. Método propuesto por Gibson, Saavedra y Spoerer (1982). Este método corresponde a la forma de seleccionar el tiempo de ciclo desarrollado en la "Metodología para la programación de redes de semáforos de tiempos prefijados" elaborada por los autores ya indicados. Básicamente, el método

utiliza la propiedad de intersecciones aisladas que dice relación con que la demora usualmente varia menos de un 20% en el rango  $0.75 C_o - 1.5 C_o$ , con  $C_o$  = ciclo óptimo individual (2, 450) y así define como criterio que el ciclo común sea tal que pertenezca a dicho intervalo para cada cruce individual. Una descripción detallada de este procedimiento se puede encontrar en (Gibson, Saavedra, & J.P., 1982)

Ambos métodos se basan en un análisis que considera las intersecciones como aisladas, y son utilizados para encontrar el tiempo de ciclo de la red.

En esta investigación se propone una combinación de ambos métodos evaluando su comportamiento, primero los ciclos de los cinco semáforos y la propuesta de un ciclo común a las dos rotondas evaluando un modelo de PLE. Como se mencionó anteriormente hay experiencia en España en la rotonda de El Saler (Valencia), Australia (Ver figura 6) y Estados Unidos (Ver figura 7) (Akcelik, 2005).

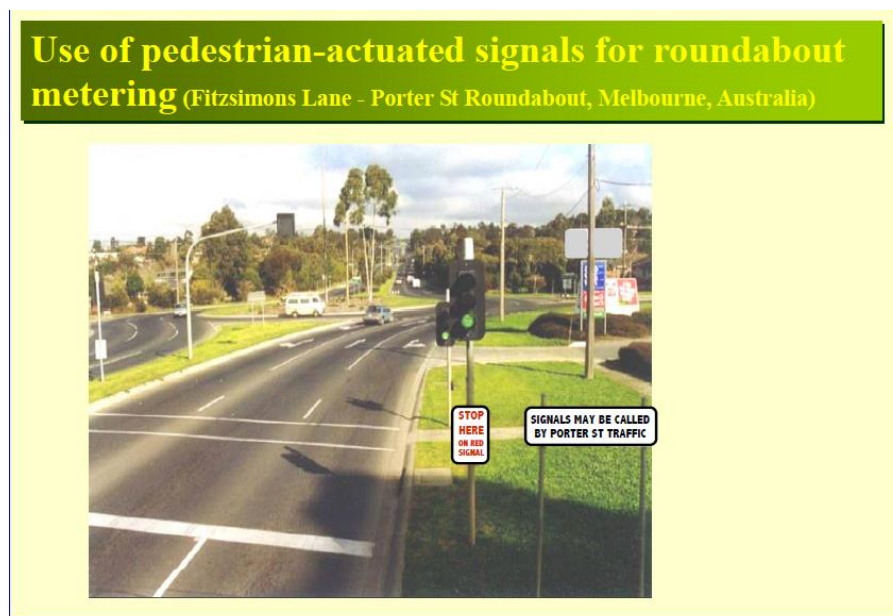


Figura 6: Rotonda semaforizada en Melbourne, Australia

**Use metering signals at the Clearwater roundabout,  
Florida, USA**



Figura 7: Rotonda semaforizada en Florida, USA

#### IV. JUSTIFICACIÓN

El objetivo principal de la regulación del tráfico por medio de los semáforos, es para que pase el mayor número posible de vehículos por segundo en la intersección y se produzcan tiempos de retención mínimos.

Esta situación ideal no se logra frecuentemente ya que existe la necesidad de dar prioridad a otras vías importantes que cruzan la primera vía, que se considera principal. También, se pueden producir obstáculos cuando la circulación de las calles transversales no sólo cruza la vía principal, si no que se integra en ella aumentando la cola de vehículos frente a un semáforo.

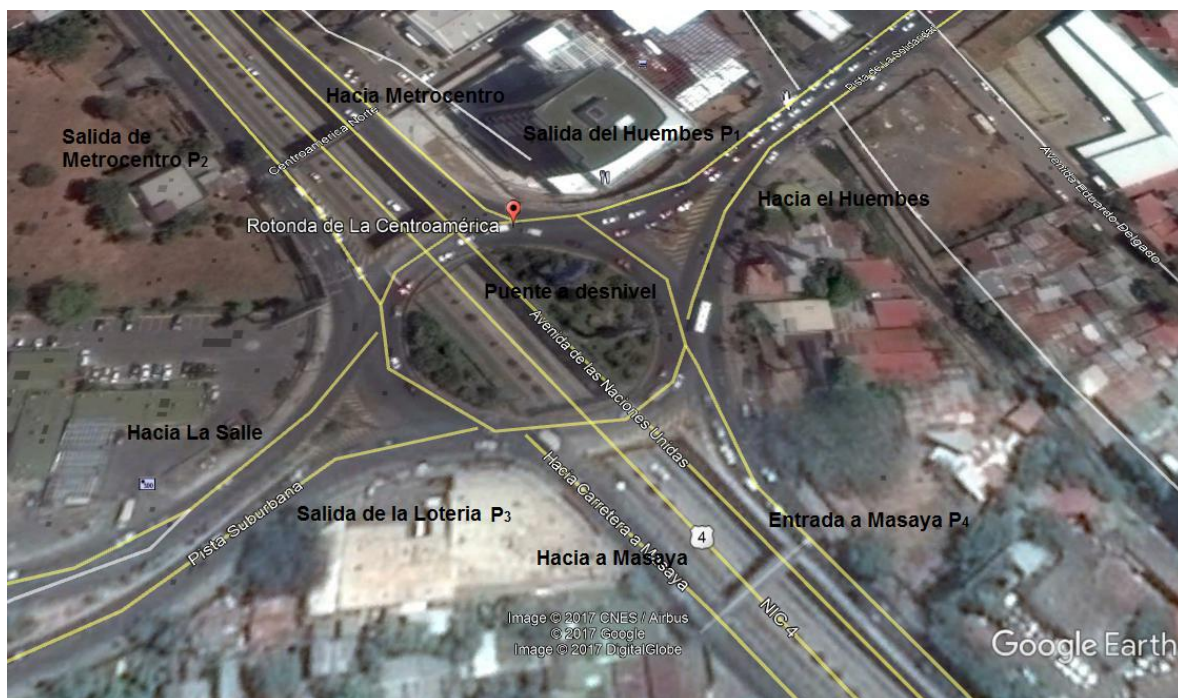
Lo que se persigue con la realización de esta investigación, es aportar a la solución del problema del congestionamiento en las horas de máxima demanda en los semáforos en los alrededores de la rotonda de la Centroamérica y la Jean Paul, con la finalidad de encontrar los tiempos óptimos de espera del tráfico vehicular, a través de modelos matemáticos de PLE para tal efecto y con la ayuda del software WinQSB, simular y justificar estos modelos así proponer ciclos de funcionamiento que mejore el flujo vehicular de acuerdo al volumen del tráfico en la zona.

Este trabajo se une a las líneas investigativas que la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, promueve a través del Departamento de Matemática y Estadística de la Facultad de Ciencia e Ingeniería, además tiene mucho interés teórico y práctico dentro el campo de la Ingeniería de Tránsito ya que al integrar las rotondas con esta relación de tiempos se mejorará la circulación de los vehículos adecuando los tiempos de tal manera que tengan relación con los semáforos más cercanos, y proponer un funcionamiento como semáforos cercanos

para los cuales los tiempos de ciclos serían de acuerdo a lo planteado en la metodología de tránsito.

A continuación, se presenta un análisis de las rotondas Centroamérica y Jean Paul, las cuales se propone relacionar como semáforos con un ciclo adecuado para mejorar el flujo vehicular a la hora pico en esta zona.

Al observar la figura 8, se puede constatar cómo se acumula el flujo de vehículos hacia Masaya (Sentido NS), ya que a los vehículos que circulan por la Rotonda para viajar hacia el mismo destino se le suma los que circulan por el puente a desnivel (dos carriles que pasan por debajo de la rotonda). A estos se le suman los que salen del mercado Roberto Huembés ( $P_1$ ) y los que vienen de Metrocentro ( $P_2$ ). También en menor medida los que viajan de la Lotería ( $P_3$ ) por el ceda al paso y muy pocos los que entran de Masaya (sentido contrario  $P_4$ ).



**Figura 8: Esquema de fluido de vehículos en la Rotonda Centroamérica**



Estas dificultades aumentan ya que el flujo llega a la Rotonda Jean Paul Genie (Ver figura 9) procedente del Club Terraza (J<sub>2</sub>), tiene que salir necesariamente hacia la otra rotonda, sumándose a los que vienen de Masaya (SN, J<sub>3</sub>), ya que la Rotonda Jean Paul sólo tiene tres sentidos, no tiene sentido EO. Este flujo satura en alguna medida la otra rotonda en este sentido. Bajo estas condiciones, sería adecuado que las rotondas funcionen sincronizadamente ya que el tramo de carretera entre ellas es de aproximadamente 1 km, como se mostró en la figura 3.



**Figura 9: Esquema de fluido de vehículos en la Rotonda Jean Paul Genie**

Para mejorar el fluido vehicular en la rotonda Centroamérica, se propone sincronizar los ciclos de los semáforos ubicados al este, Farmacia Vida, al norte Edificio Pellas, al oeste La Salle y al sur la Rotonda Jean Paul Genie y establecer una relación en las fases respectivas para lograr un ciclo óptimo para su funcionamiento .

De esta manera el ciclo propuesto para la rotonda Centroamérica quedaría conformado como sigue: en la fase norte se relacionaría con el verde del semáforo





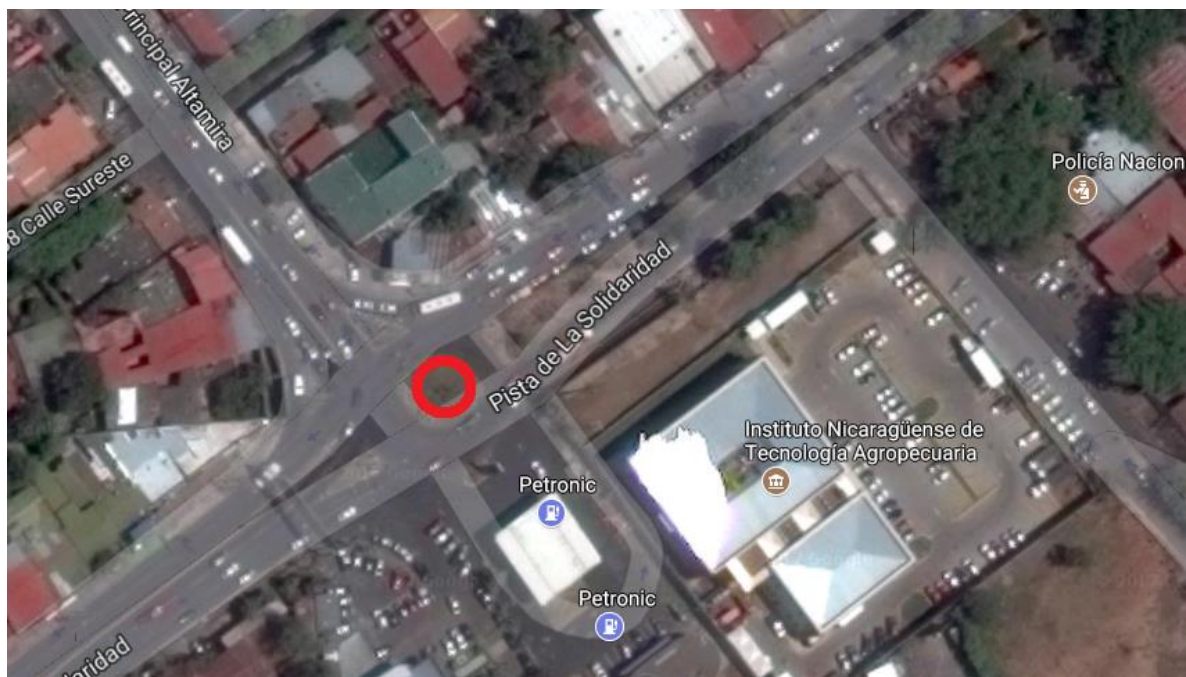
**Figura 11: Esquema de fluido de vehículos en la Rotonda Jean Paul Genie**

De esta manera el ciclo propuesto para la rotonda Jean Paul Genie quedaría conformado como sigue: en la fase norte con la otra rotonda, en la fase oeste con el semáforo de Galerías y en la fase sur con el semáforo de Las Colinas.

Cabe destacar aquí que existe una pequeña rotonda con semáforos (falsa rotonda), con similar geometría de la Jean Paul cerca del Centro Comercial Managua, Loselza (Ver figura 12), esto se puede aprovechar como ejemplo en término de las fases propuestas en esta investigación. Otra oportunidad es que ya hay la infraestructura instalada en la rotonda Jean Paul, sólo sería coordinar con los semáforos cercanos.

Al implementar esta propuesta se lograría recuperar el espacio peatonal el cual se reduce en este tipo de intersección y dado el crecimiento comercial en la zona sería bueno establecer este tipo de señales viales adecuadas a la zona para proteger al peatón.





**Figura 12: Esquema de flujo de vehículos en la falsa Rotonda Loselza.**

## V. OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo General

Evaluar las medidas de rendimiento óptimos de los semáforos ubicados en los alrededores de las rotondas Centroamérica y Jean Paul Genie, para calcular un ciclo común que permitan agilizar la circulación y mejorar la operatividad entre ellas.

### 5.2 Objetivos Específicos

1. Analizar la situación actual de los semáforos en estudio y su relación con las rotondas Centroamérica y Jean Paul Genie en términos de sus fases y ciclos comunes.
2. Seleccionar los elementos más importantes para hacer una propuesta entre las fases de los semáforos y ciclos de las rotondas Centroamérica y Jean Paul Genie que permitan agilizar la circulación y mejorar la operatividad entre ellas.
3. Hacer una valoración sobre esta relación por medio del cálculo de un ciclo común entre las dos rotondas, Centroamérica y Jean Paul Genie, para verificar las coincidencias con los semáforos en estudio.

## VI. MARCO TEORICO

### 6.1 Perspectiva teórica

Según Cal y Mayor y Cárdenas (1994), el primer semáforo se usó en Londres en el año 1868 en la forma de un dispositivo mecánico manejado por un policía de transporte. Luego, en 1914 en la ciudad de Cleveland, Estados Unidos, se instaló el primer semáforo eléctrico. Poco tiempo después, en 1917, se instala en Salt Lake City, en este mismo país, la primera red de semáforos.

El objetivo de un semáforo es eliminar conflictos entre usuarios de una intersección mediante la separación temporal de estos y de acuerdo a sus demandas o flujos relativos. O sea, se trata de dar el paso alternado a los distintos movimientos de vehículos y peatones para que crucen la intersección con un mínimo de inconveniente, como demoras y riesgos. (Fernández Aguilera, 2014)

Una intersección es el área común de dos vías que se cruzan. Un uso basado en un diseño apropiado de esta área puede contribuir a la fluidez del tráfico; por el contrario, un mal diseño genera problemas que se observan en la circulación. El objetivo de una intersección es facilitar el paso de flujos de tráfico desde una vía a otra de forma eficiente y segura. En este sentido, una intersección puede ser descrita como la confluencia de movimientos conflictivos entre vehículos y peatones.

Los conflictos entre movimientos que tienen lugar en una intersección son del tipo direccional (por diferencia de trayectorias) y se pueden clasificar, como se observa en la figura 13 (Fernández Aguilera, 2014).

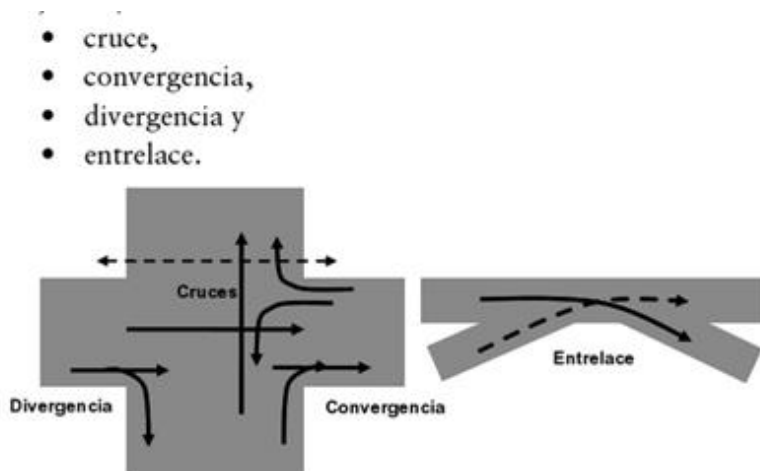
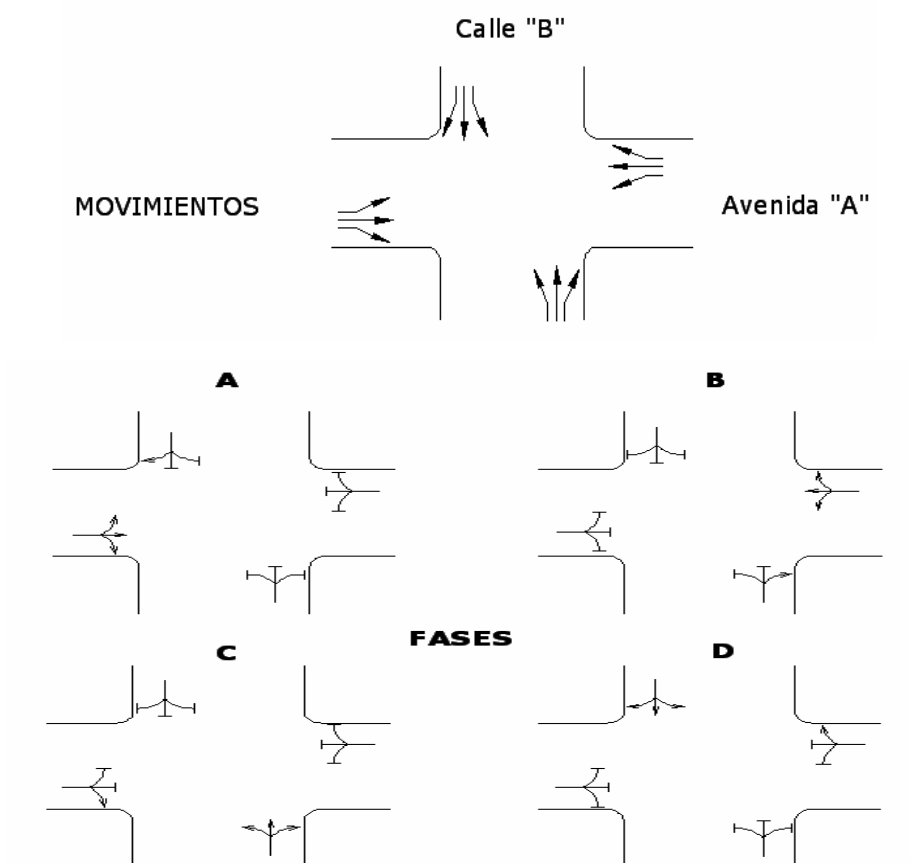


Figura 13: Conflictos en intersecciones

A continuación, en la figura 14, se presenta una intersección de cuatro accesos operada con un semáforo de cuatro fases. En ella se observa en forma esquemática los conceptos de longitud de ciclo, intervalos y fases.



**Figura 14: Fases en una intersección con semáforo**

### 6.1.1 Flujo de saturación y tiempo perdido

Formalmente fue Webster en el año 1958 quien introdujo el concepto de Tasa de Flujo de saturación como el flujo que se obtendría si teniendo una fila de infinitos vehículos en el acceso de una intersección se le diera verde constante, de manera tal de tener una circulación sin interrupciones durante una hora.

Rahmi. Akcelik (1989) es el investigador que más ha estudiado la capacidad de intersecciones con semáforo, con base en los conceptos de flujo de saturación, automóviles equivalentes, tiempo perdido y verde efectivo, entre otros. Cuando el

semáforo cambia a verde, el paso de los vehículos que cruzan la línea de ALTO se incrementa rápidamente a una tasa llamada flujo de saturación, la cual permanece constante hasta que la fila de vehículos se disipa o hasta que termina el verde.

La tasa de vehículos que cruzan la línea al arrancar es menor durante los primeros segundos, mientras los vehículos aceleran hasta alcanzar una velocidad de marcha normal. Similarmente, durante el periodo posterior a la terminación del verde, la tasa de vehículos que cruzan la línea es menor debido a que algunos vehículos disminuyen su velocidad o se detienen.

El flujo de saturación es la tasa máxima de vehículos que cruzan la línea que puede ser obtenida, cuando existen filas y éstas aún persisten hasta el final del periodo verde. En este caso, se tiene un periodo de verde completamente saturado. En la Ciudad de México se han encontrado flujos de saturación del orden de los 1 800 vehículos ligeros por hora de luz verde por carril. (Akcelik, 1989)

La figura 15 muestra las relaciones fundamentales que caracterizan este fenómeno. La línea punteada indica el modelo básico o curva de flujo efectivo, que reemplaza la curva de flujo actual de vehículos que cruzan la línea por un rectángulo de igual área, cuya altura es el flujo de saturación  $s$  y cuyo ancho es el tiempo verde efectivo  $g$ . En otras palabras, el área bajo la curva,  $sg$ , representa el máximo número de vehículos que cruzan la línea en un ciclo promedio.

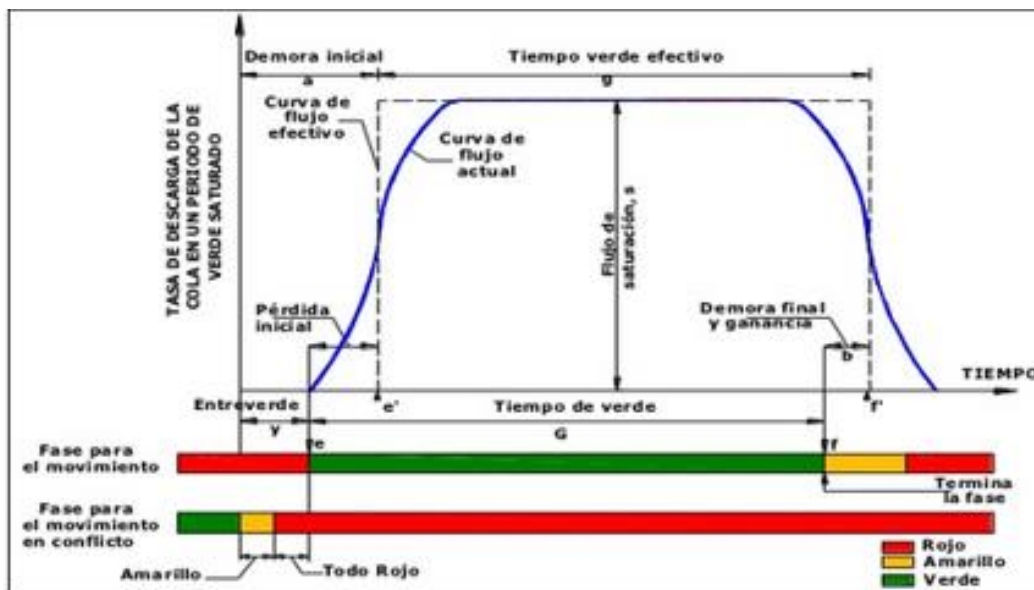


Figura 15: Modelo básico de flujo de saturación

Para que dichos objetivos se cumplan, el elemento fundamental es sincronizar el ciclo de los semáforos, es decir, la secuencia de estados (rojo, verde, etc.) por la que pasan los semáforos y que se repite de *manera cíclica*.

Este ciclo de los semáforos se debe estudiar desde tres puntos de vista distintos:

1. La longitud en tiempo del ciclo completo de los semáforos, es decir, el tiempo necesario para que se dé una sucesión completa de indicaciones en los semáforos conectados a un mismo regulador. Independientemente de lo que resulte de los cálculos, la duración del ciclo tiene que estar forzosamente comprendida entre los límites que fija la psicología del conductor. La práctica indica que ciclos menores de 35 segundos o mayores de 120 se acomodan difícilmente a la mentalidad del usuario de la vía pública (Sánchez-Toscano Barbero, J. (2003).
2. El porcentaje del tiempo dedicado para cada una de las fases, es decir el porcentaje del tiempo dedicado a cada una de las combinaciones de

indicaciones que permiten uno o varios movimientos simultáneos a través de la intersección.

3. Las transiciones entre los semáforos consecutivos. Un ejemplo típico de esta circunstancia es la presencia de dos semáforos consecutivos en una avenida.

En este caso se define el tiempo de transición (offset time) como el tiempo desde que un semáforo pasa a estado verde hasta que el siguiente semáforo de la avenida pasa también a verde.

### 6.1.2 Cálculo del ciclo óptimo

De manera general los ciclos de los semáforos se establecen a través de diferentes metodologías tales como el Método Webster, Americano, Simultáneo (ALLSOP) y Modelo Secuencial (Akcelik).

#### a) MÉTODO WEBSTER

F. V. Webster (Cal y Mayor & Cárdenas, 2007) con base en observaciones de campo y simulación de un amplio rango de condiciones de tránsito, demostró que la demora mínima de todos los vehículos en una intersección con semáforos, se puede obtener para una longitud de **ciclo óptimo** de:

$$C_0 = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^{\varphi} Y_i}$$

Donde:

$C_0$  = Tiempo óptimo de ciclo (s)

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

$Y_i$  = Máximo valor de saturación entre el flujo actual y el flujo de saturación para la fase  $i$ .

$\varphi$  = número de fases.



b) **MODELO AMERICANO**

*Intervalo de descarga*

Los valores  $t_i$ , que son los tiempos que supera el valor del intervalo de descarga al de saturación  $h$  en los primeros vehículos, al ser sumados resulta el tiempo perdido total en el arranque del verde como se indica a continuación:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N t_i$$

Donde:

$\lambda$  = Tiempo perdido total en el arranque del verde [s]

$t_i$  = Tiempo perdido en el arranque del vehículo  $i$  [s]

$N$  = Último vehículo en cola con intervalo de descarga mayor que el de saturación.

c) **MÉTODO SIMULTÁNEO (ALLSOP)**

Este procedimiento, desarrollado por Allsop (1971) aborda el problema de determinar el ciclo y repartos de un semáforo aislado usando programación lineal.

d) **MODELO SECUENCIAL (AKCELIK)**

El enfoque tradicional se basa en la minimización de las demoras a los vehículos de los movimientos críticos, basadas en Webster (1958). Así, según esto, el tiempo de ciclo óptimo de la intersección viene dada por la expresión aproximada siguiente:

$$C_0 = \frac{1.5L+5}{1-Y} \text{ (seg)}$$

No obstante, existen algunas objeciones al criterio de minimización de demoras a los vehículos que pueden plantearse.

La primera en relación con la no-consideración de las demoras a los usuarios, sólo de los vehículos. La incorporación de tasas de ocupación tiende a subsanar éste hecho; sin embargo, si los vehículos de un mismo movimiento están compuestos por corrientes que tienen distintas tasa de ocupación, el uso de tasas de ocupación no parece tan claro para resolver esta objeción. La segregación de corrientes con alta ocupación y otorgarle prioridad (pista sólo bus y prioridad en semáforos, por ejemplo) puede ser una alternativa, pero en presencia de altos flujos de buses y mal comportamiento en paraderos su efecto tiende a desaparecer.

Otra objeción en relación con el consumo de combustible y que se relaciona con el número de detenciones. Estas están también relacionadas con los accidentes, especialmente con los choques por detrás. Luego, una función compuesta de demoras y detenciones propuesta por Akcelik parece ser la respuesta a esto:

$$C_0 = \frac{(1.4+k)L+6}{1-Y} \text{ (seg)}$$

Con:

$$k = \begin{cases} 0, & \text{para minimizar demoras} \\ 0.2, & \text{para minimizar demoras y combustible} \\ 0.4, & \text{para minimizar combustible} \end{cases}$$

No obstante, este criterio sólo considera los movimientos críticos (que definen L e Y), pero también los no-críticos dan origen a consumos de recursos; para estos el ciclo optimo será probablemente menor.

En este estudio se utilizó el **Método Webster**, ya que es la metodología utilizada por la Policía Nacional (W, D., & E., 2014), el cual utiliza información sobre **aforos** realizados para determinar el tamaño de los ciclos que permite la minimización de las demoras a los vehículos de los movimientos críticos.

Hay ideas de relacionar los ciclos de los semáforos en varias intersecciones y encontrar un ciclo común en (Fernández Aguilera, 2014). De la teoría se sabe que para cada intersección existe un tiempo de ciclo mínimo  $C_{min}^{(k)}$  que puede acomodar la demanda de tráfico sin que ningún movimiento se sobresature. Este ciclo se calcula como:

$$C_{min}^{(k)} = \frac{L^{(k)}}{1 - Y^{(k)}}$$

Donde  $Y^{(k)}$  es el factor de carga de la intersección k. En el caso que la intersección k está sobresaturada, se toma  $C_{min}^{(k)} = C_{max}$ . Donde  $C_{max}$  es el tiempo de ciclo máximo aceptable.

En la figura 16 es posible observar que el mejor tiempo de ciclo para las tres intersecciones que se muestran es:

$$C = \min \left\{ C_{max}, \max \left\{ C_{min}^{(k)} \right\} \right\}$$

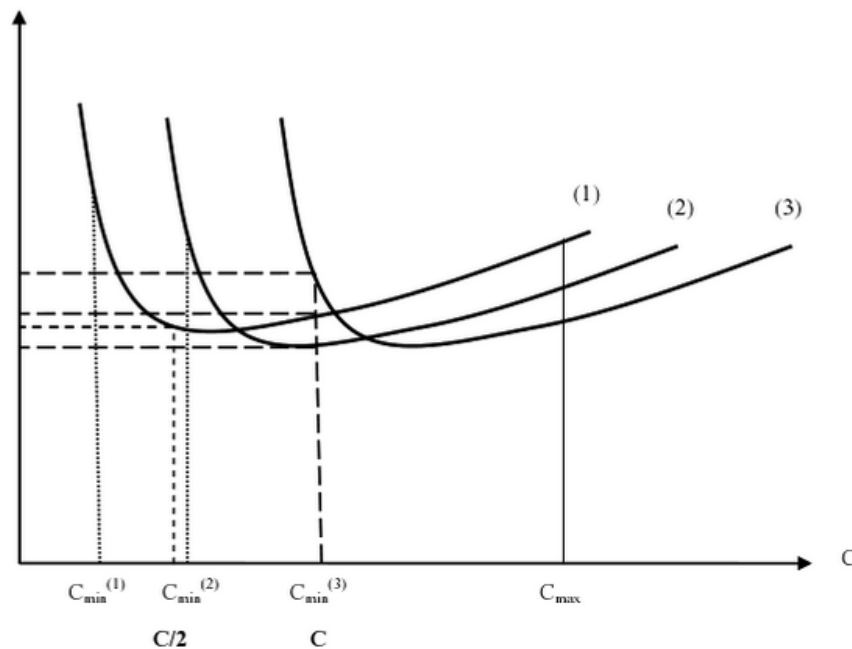


Figura 16: Comportamiento de la demora con el tiempo del ciclo

Una vez definido el tiempo de ciclo común y cuáles intersecciones operaran con doble ciclo, se realiza una búsqueda conjunta de repartos y desfases. Este proceso se debe efectuar mediante un procedimiento heurístico de búsqueda numérica.

Por otro lado, como se menciona el, Lazo et al. (1981) “se recomienda que semáforos localizados en una distancia longitudinal no mayor de 800 metros, estén coordinados entre sí, siempre y cuando se tengan sobre una avenida principal o carretera”. (Lazo Margáin & Sánchez Ángeles, 1981).

Continúa mencionando que la coordinación de los semáforos es más eficaz, cuando las longitudes de ciclo de ellos y sus diferentes fases ya han sido establecidos de antemano. Es importante tener en mente, que generalmente todos los semáforos de un mismo sistema deberán tener igual longitud de ciclo. Sin embargo, condiciones especiales tales como la longitud entre semáforos, las velocidades que se desarrollan entre ellos, pueden hacer deseable que las longitudes de ciclo en semáforos determinados sean múltiplos o submúltiplos de la longitud del ciclo predominante.

Basados en estas experiencias, en este estudio se planteó la idea de considerar los ciclos de los semáforos como sucesiones aritméticas de la forma:  $C_p = a + pn_p$ , donde  $a$  es el desfase y  $n_p$  son números naturales dependientes del ciclo y  $p$ . La solución de este problema es determinar el conjunto de valores  $n_p$  tales que los ciclos  $C_p$  sean iguales en términos de las coincidencias.

Para fines prácticos se garantizará que todos los ciclos de prueba deben quedar dentro del rango  $0.5 C_0 \leq C_p \leq 1.5 C_0$ , donde  $C_0$  es el ciclo óptimo (Cal y Mayor & Cárdenas, 2007).

Por ejemplo, si  $p = 3$  y  $5$  se tiene  $C_3 = a + 3n_3$  y  $C_5 = a + 5n_5$  donde  $C_p$  es natural, entonces existe  $n \in \mathbb{N}$  tal que:

$$a + 3n_3 \geq n \Rightarrow n_3 \geq \frac{n - a}{3}$$

$$a + 5n_5 \geq n \Rightarrow n_5 \geq \frac{n - a}{5}$$

De lo anterior el número  $n - a$  tiene que ser divisible por 3 y 5, es decir tiene que ser un múltiplo del M.C.M (3,5)=15, por lo tanto la solución es de la forma  $n = a + 15k, k \in \mathbb{N}$ . Por ejemplo, para  $k = 1, n_3 = 5, n_5 = 3$  y  $C_3 = C_5 = 15 + a$ .

Por lo tanto la solución al problema de la existencia de la relación entre los ciclos de dos semáforos para la fase que los relaciona, se verificará por la cantidad de coincidencias de los tiempos verdes de los dos ciclos en un periodo de tiempo supuesto como la hora de máxima demanda, la cual está relacionada por el mínimo de los Mínimos Común Múltiplo (MCM) de dos ciclos dados.

Para obtener una medida general de esta relación se diseñó el siguiente *algoritmo heurístico* que determina el óptimo de todas las combinaciones posibles dentro de los rangos de dos ciclos dados. Este valor será el número entero de segundos en el cual los dos ciclos  $C_1$  y  $C_2$  tienen una primera coincidencia, lo que se requiere es que esta frecuencia sea mayor

Estas propuestas de los tiempos calculados se pueden utilizar para mejorar los tiempos calculados con la metodología de tránsito ya que estos tiempos utilizan un redondeo a los cinco segundos más próximos y es ahí donde se podrían utilizar para obtener una mejor relación en términos de la propuesta en este estudio. Relacionar los ciclos de ésta manera durante del periodo de máxima demanda permite alcanzar un número de coincidencias máximo.

<b>Algoritmo de cálculo para dos ciclos dados<sup>4</sup></b>
<p><b>Datos iniciales: Ciclos <math>C_1, C_2</math> (<math>C_1 &lt; C_2</math>)</b></p> <p><b>Calcular Límite inferior (LI): <math>C_1-5</math>, Limite Superior (LS): <math>C_2+5</math></b></p> <p><b>Calcular todas las combinaciones <math>\{C_i, C_j\}</math> (Matriz de dimensión LI x LS)</b></p> <p style="padding-left: 40px;"><b>a) Calcular Min <math>\{ MCM\{C_i, C_j\} \}</math> ; <math>i, j = \{LI, LS\}</math></b></p> <p><b>Si <math>MCM \{C_1, C_2\} = \text{Min} \{ MCM\{ C_i, C_j\} \}</math> entonces, el óptimo es <math>\{C_1, C_2\}</math>. Fin</b></p> <p><b>Por otro lado, si <math>MCM \{C_1, C_2\} &gt; \text{Min} \{MCM\{ C_i, C_j\} \}</math> entonces, la mejor combinación es <math>\{C_{1m}, C_{2m}\}</math></b></p> <p style="padding-left: 40px;"><b>b) Calcular Max <math>\{ MCD\{C_i, C_j\} \}</math> ; <math>i, j = \{LI, LS\}</math></b></p> <p><b>Si el <math>MCD\{C_{1m}, C_{2m}\} &lt; \text{Max} \{ MCD\{C_i, C_j\} \}</math> entonces, el optimo es <math>\{C_{1o}, C_{2o}\}</math>. Fin</b></p> <p><b>Por otro lado, si el <math>MCM\{C_{1m}, C_{2m}\} &gt; \text{Max} \{ MCM\{C_i, C_j\} \}</math> ; <math>i, j = \{LI, LS\}</math> entonces, existe un óptimo alternativo diferente de <math>\{C_{1o}, C_{2o}\}</math>. Fin</b></p>

Para aplicar el algoritmo se tomó un ejemplo (Cal y Mayor & Cárdenas, 2007), donde un ciclo de 83.5 segundos se redondea a 85 y tomando un ciclo de 120 segundos, encontramos que el valor del MCM  $(85, 120)=2040$  segundos y que la primera coincidencia ocurriría hasta el segundo 2040 y el número de coincidencias es aproximadamente como máximo 2 veces en la hora de máxima demanda  $(3600/2040)$ .

Para verificar si se puede aumentar el número de coincidencia, se utilizó el programa elaborado para tal efecto. Considerando lo anterior, el espacio en el programa (ver anexo 2) se tomará como límite inferior 80 ( $C_1 - 5$ ) y como límite superior 125 ( $C_2 + 5$ ). El programa presenta como solución óptima la combinación  $(80,120)$ , de esta manera el número de coincidencias es ahora de 15  $(3600/240)$ ,

---

<sup>4</sup> Se elaboró el programa Mac 1.0.4 con su respectivo manual el cual aparece en el anexo 2.

en esta propuesta el ciclo original de 85 se ha reducido a 80, esta propuesta se encuentra entre lo permisible.

Para este caso particular, el óptimo tiene un MCD de 40 que no coincide con el mayor máximo común divisor que es 41, esto plantea que es posible tener soluciones alternativas, como en este caso (82, 123), pero el número de coincidencias es similar (3600/246). (Ver figura 17)

En esta propuesta los ciclos originales 85 y 120, el primero se ha reducido en 3 segundos y el segundo se aumentó 3 segundos respectivamente. Como se puede observar aparecen otras alternativas que se podrían evaluar según la situación presente siempre y cuando se respecten en la medida de lo posible los rangos de establecidos para el tamaño de los ciclos

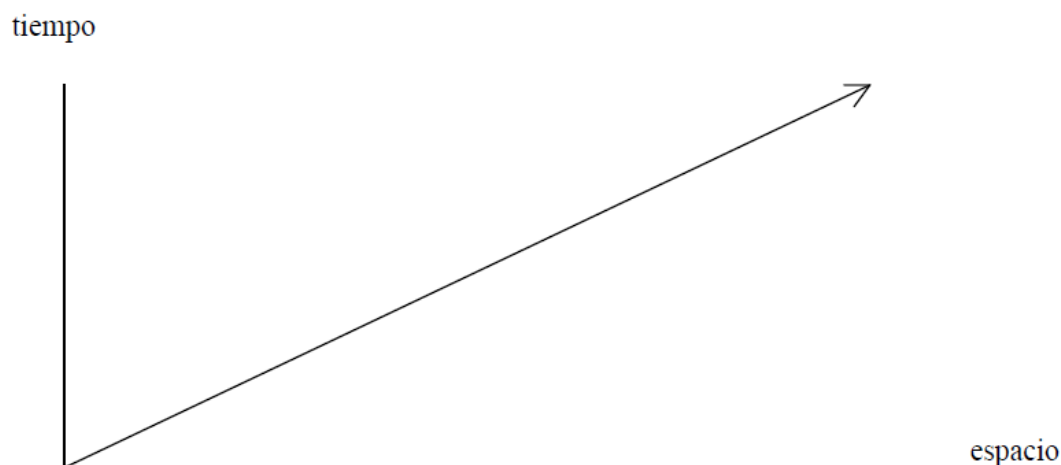
Rango de Valores							Mejor Combinación (MCM)			
Limite Inferior	Limite Superior	Calcular	Limite de Tiempo (seg)	Dimensión de la Matriz			240			
80	125	Limpiar		46	80 ≤ D ≤ 125		41			
81	120	121	122	123	124	125	Ciclos i	Ciclos j	MCM	MCD
81	9639	3240	9801	9882	3321	10044	120	80	240	40
82	9758	4920	9922	5002	246	5084	108	81	324	27
83	9877	9960	10043	10126	10209	10292	123	82	246	41
84	1428	840	10164	5124	3444	2604	114	84	336	28
85	595	2040	10285	10370	10455	10540	102	85	510	17
86	10234		10406	5246	10578	5332	80	86	940	2
87	10353	3480	10527	10614	3567	10788	116	87	348	28
88	10472	1320	968	5368	10824	2728	110	88	440	22
89	10591	10680	10769	10858	10947	11036	120	90	360	30
90	10710	360	10890	5490	3690	5580	104	91	728	13
91	1547	10920	11011	11102	11193	11284	115	92	460	23
92	10948	2760	11132	5612	11316	2852	124	93	372	31
93	11067	3720	11253	11346	3813	372	114	95	670	19
94	11186	5640	11374	5734	11562	5828	120	96	480	24
95	11305	2280	11495	11590	11685	11780	84	98	588	14
96	11424	480	11616	5856	3936	2976	88	99	792	11
97	11543	11640	11737	11834	11931	12028	80	100	420	28
98	1666	5880	11858	5978	12054	6076	85	102	510	17
99	11781	3960	1089	12078	4059	12276	91	104	728	13
100	11900	600	12100	6100	12300	3100	84	105	420	21
101	12019	12120	12221	12322	12423	12524				
102	714	2040	12342	6222	4182	6324				

Figura 17: Salida óptima del programa para relacionar dos semáforos a partir de dos ciclos dados.

### 6.1.3 Diagrama espacio-tiempo.

Un diagrama espacio-tiempo es un gráfico que se utiliza para determinar la posición de una partícula –que realiza un movimiento rectilíneo- a lo largo del tiempo. Dados unos ejes cartesianos en los que en ordenadas se representa el tiempo y en abscisas la distancia, la representación de la trayectoria de un vehículo que acelera desde 0 es una curva creciente y la pendiente de la recta tangente a dicha curva en un punto es la velocidad instantánea de dicho vehículo.

Para simplificar este modelo se supone que los vehículos circulan a velocidad constante, y por lo tanto la curva que representa la trayectoria se convierte en una recta cuya pendiente representa la velocidad ( $v = e / t$ ) (Ver figura 18). Cuanto menor es la pendiente de la recta mayor velocidad, y cuanto mayor es la pendiente menor velocidad. Una recta vertical representaría un vehículo parado y una recta horizontal un vehículo con una velocidad infinita (cosa del todo imposible).



**Figura 18: Representación de la trayectoria de un vehículo que circula a velocidad constante.**

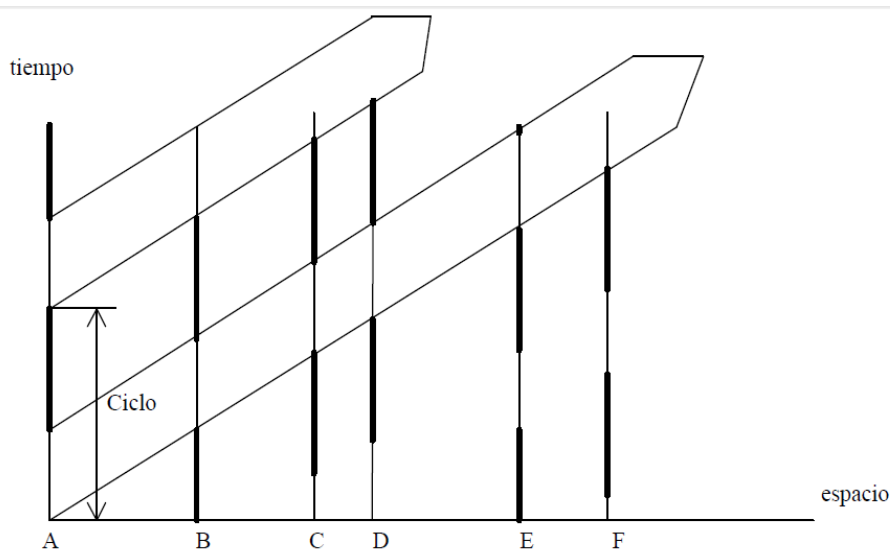


Para la coordinación de intersecciones empleamos el diagrama espacio-tiempo de la siguiente manera: situamos sobre el eje de abscisas las diferentes intersecciones; sobre la vertical de cada intersección, se representa el estado, a lo largo del ciclo, de los semáforos que regulan la vía que se desea coordinar; se indican con un trazo grueso los periodos en los que el semáforo está en rojo y con un trazo fino los que está en verde (el ámbar se considera incluido en el tiempo de verde).

El método, en una primera aproximación, consiste en hacer pasar una franja del mayor ancho posible por los huecos de verde de intersecciones sucesivas (Ver figura 19).

Normalmente se representa una sola banda, ya que las restantes –tantas como ciclos se representados- serán exactamente iguales, pero separadas entre sí una distancia equivalente a la duración de un ciclo.

Puesto que el objetivo es que dicha banda sea lo más ancha posible, se llama *eficacia* de una onda verde a la relación que existe entre su anchura, medida en segundos, y la duración del ciclo.



**Figura 19: Diagrama de espacio-tiempo aplicado a la coordinación de intersecciones.**

## 6.2 Marco teórico

Para un mejor entendimiento y un enfoque más claro y completo del tema en el presente trabajo se desarrollan ciertos conceptos y definiciones para así obtener un soporte teórico para el desarrollo del tema.

### 6.2.1 Semáforos

Los semáforos son dispositivos electromagnéticos y electrónicos proyectados específicamente para facilitar el control de tránsito de vehículos y peatones, mediante indicaciones visuales de luces de colores universalmente aceptados, como lo son el verde, amarillo y el rojo.

Su finalidad principal es la de permitir el paso, alternadamente, a las corrientes de tránsito que se cruzan, permitiendo el uso ordenado y seguro del espacio disponible. Los semáforos se pueden clasificar desde dos puntos de vista. Según la duración del ciclo y los tiempos verdes, se clasifican en semáforo fijo o activado por el tráfico; según su conectividad espacial, existen semáforos aislados o semáforos en red (Gibson et al, 1982)

Cualquiera que sea el caso, la programación de un semáforo para por las etapas siguientes:

- a) Diseño de fases, para ello es necesario: Identificar movimientos y número y secuencia de fases.
- b) Cálculo de entreverdes.
- c) Determinación del tiempo de ciclo. El *ciclo* es la duración de la secuencia completa de fases.
- d) Calculo de repartos.
- e) Determinación de desfases.(Fernández Aguilera, 2014)

## 6.2.2 Ventajas y desventajas de los semáforos

Tabla 1: Ventajas y desventajas de los semáforos

Ventajas	Desventajas
<b>Ordena la circulación del tránsito y, en muchos casos, mediante una asignación apropiada del derecho al uso de la intersección, optimiza la capacidad de las calles.</b>	Se incurre en gastos no justificados para soluciones que podrían haberse resuelto solamente con señales o en otra forma económica.
<b>Reduce la frecuencia de cierto tipo de accidentes.</b>	Causan demoras injustificadas a cierto número de usuarios, especialmente tratándose de volúmenes de tránsito pequeños, al causar retardos molestos por excesiva duración de la luz roja o del tiempo total del ciclo.
<b>Con espaciamientos favorables se pueden sincronizar para mantener una circulación continua, o casi continua, a una velocidad constante en una ruta determinada. En algunos casos, esa velocidad constante es conveniente reducirla para fines de seguridad.</b>	Producen reacción desfavorable en el público, con la consiguiente falta de respeto hacia ellos o hacia las autoridades.
<b>Permiten interrumpir periódicamente los volúmenes de tránsito intensos de una arteria, para conceder el paso de vehículos y peatones de las vías transversales. Así, en zonas escolares, ayudan a los estudiantes a cruzar con mayor seguridad.</b>	Incrementan en el número de accidentes del tipo alcance, por cambios sorpresivos de color.
<b>En la mayoría de los casos representan una economía considerable por mayor habilidad en el control del tránsito con respecto a la utilización de otras formas de control, como por ejemplo señales o policías de tránsito.</b>	Ocasionan pérdidas innecesarias de tiempo en las horas del día, cuando se presentan escasos volúmenes de tránsito cuando no requiere control de semáforo.
	En intersecciones rurales, la aparición intempestiva de un semáforo ocasiona accidentes cuando no hay avisos previos adecuados.
	Cuando son operados por los agentes de tránsito, causan mayores demoras en los accesos y enojo en los automóviles.

### 6.2.3 Semáforos de tiempo fijo

Se utilizan en intersecciones donde los patrones de tránsito son relativamente estables, o en las que las variaciones de intensidad de la circulación se pueden adaptar a un programa previsto, sin ocasionar demoras o congestionamientos excesivos.

**Tabla 2: Volumen mínimo de vehículos (requisito 1): Los volúmenes para las calles principal y secundaria corresponden a las mismas ocho horas**

Número de carriles de circulación por accesos		Vehículos por hora en la calle principal (total en ambos accesos)		Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria (un solo sentido)	
Calle principal	Calle secundaria	Urbano	Rural	Urbano	Rural
1	1	500	350	150	105
2 ó mas	2 ó mas	600	420	150	105
2 ó mas	2 ó mas	600	420	200	140
1	1	500	350	200	140

Interrupción del tránsito continuo: Se aplica cuando las condiciones de operación de la calle principal son de tal naturaleza que el tránsito en la calle secundaria sufre demoras o riesgos excesivos, al entrar o cruzar la calle principal.

**Tabla 3: Volumen mínimo de vehículos (requisito 2)**

Número de carriles de circulación por accesos		Vehículos por hora en la calle principal (total en ambos accesos)		Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria (un solo sentido)	
Calle principal	Calle secundaria	Urbano	Rural	Urbano	Rural
1	1	750	525	75	53
2 ó mas	1	900	630	75	53
2 ó mas	2 ó mas	900	630	100	70
1	2 ó mas	750	525	100	70

#### 6.2.4 Relación de los verdes efectivos por fases en dos semáforos.

Como las capacidades (Cal y Mayor & Cárdenas, 2007) “en una intersección se define para cada acceso o grupo de carriles, como la tasa de flujo máxima que puede pasar a través de la intersección bajo *condiciones prevalecientes* del tránsito, de la calle y de semáforo. “

Se calcula mediante la siguiente ecuación:  $c_i = s_i \left(\frac{g_i}{C}\right)$

Donde:

$c_i$ = capacidad del grupo de carriles i (vehículos/ h)

$s_i$ =tasa de flujo de saturación por grupo de carriles i (vehículos/ hora verde)

$g_i$ =tiempo verde efectivo para el grupo de carriles i (segundos verdes)

$C$ =ciclo del semáforo (segundos)

$g_i/C$ =relación de verde efectivo para el grupo de carriles i

Como las capacidades  $c_i$  y  $c_j$  de un semáforo aumenta por la existencia de las vías alternas, se considera que la mejor relación entre los tiempos verdes de los ciclos de los semáforos i y j en cada fase debe ser menor o igual para ambos, de aquí se deduce de lo siguiente:

$$s_i g_i / C_i \leq s_j g_j / C_j$$

$$(s_i / s_j)(C_j / C_i)(g_i) \leq g_j$$

Donde la variable s, g y C son las saturaciones, verde efectivo y ciclos respectivamente en cada semáforo i y j respectivamente.

Para analizar las relaciones de verde efectivo vamos a suponer que las saturaciones en ambos semáforos son iguales, de aquí se deduce una fórmula que relaciona el verde efectivo j con y el verde efectivo i como sigue:

$$(C_j/C_i)(g_i) \leq g_j$$

Para verificar esta relación, se tomó como referencia un ciclo de 85 segundos (Tabla 4) y 120 segundos (Tabla 5) con la distribución de tiempos dadas para cada fase y suponiendo que están relacionados en la fase Norte, se puede constatar que el verde efectivo debería ser  $g_{jN} \geq (120/85)(31)=44$  o más, y actualmente tiene 52 (Tabla 5), es decir 8 segundos más de lo necesario.

Al realizar los mismos cálculos de la misma manera para las otras fases dio como resultado lo siguiente:

$$g_{jW} \geq (120/85)8=12 \text{ (Actualmente tiene 10 hay una diferencia de dos segundos)}$$

$$g_{jS} \geq (120/85)16=23 \text{ (Actualmente tiene 21 hay una diferencia de dos segundos)}$$

$$g_{jE} \geq (120/85)10=15 \text{ (Actualmente tiene 17 el cual es mayor que 15)}$$

Según estos resultados la única fase sobregirada es la norte, es decir tiene menor relación, esto es muy común en algunos lugares lo que ocasiona retardo en las otras fases, por otro lado, sería bueno revisar los giros a la derecha e izquierda para lograr un mejor flujo ya que en muchos casos el tráfico se frena por esta obstrucción.

En el caso de las fases Oeste y Sur hay una diferencia de dos segundos respecto al valor necesario para tener una mejor circulación. Por último, la fase Este está bien en relación al flujo propuesto para estos dos ciclos.

Tabla 4: Fases de un semáforo con ciclo 85 segundos

Fases No.	Acceso	Tiempo (segundos)		
		Verde	Amarillo	Rojo
1	<b>Norte(N)</b>	31	3	51
2	<b>Oeste(W)</b>	8	3	74
3	<b>Sur(S)</b>	16	3	66
4	<b>Este(E)</b>	10	3	72

Tabla 5: Fases de un semáforo con ciclo 120 segundos

Fases No.	Acceso	Tiempo (segundos)		
		Verde	Amarillo	Rojo
1	<b>Norte(N)</b>	52	3	65
2	<b>Oeste(W)</b>	10	3	107
3	<b>Sur(S)</b>	21	3	96
4	<b>Este(E)</b>	17	3	100

Realizando ahora los cálculos a la inversa utilizando la Tabla 4, es decir para los verdes  $g_i$  para las diferentes fases:

$$g_i \leq (C_i/C_j)g_j$$

Por ejemplo se puede constatar que en la fase Norte el verde efectivo debería ser  $g_{iN} \leq (85/120)(52)=36.8$  o menos, lo cual es correcto. Al realizar los mismos cálculos de forma similar para las otras fases dio como resultado lo siguiente:

$$g_{iW} \leq (85/120)12=8.5 \text{ (Actualmente tiene 8 segundos)}$$

$g_iS \leq (85/120)23=16.3$  (Actualmente tiene 16 segundos)

$g_iE \leq (85/120)17=12$  (Actualmente tiene 10 segundos)

En las Tablas 6 y 7 se presenta las mejoras que relacionan los porcentajes de verdes en ambos semáforos. Como se puede observar todos porcentajes de verdes en la Tabla 6 son menores o iguales que los porcentajes en la Tabla 7.

Tabla 6: Fases de un semáforo con ciclo 85 segundos con las fases mejoradas.

Fases No.	Acceso	Tiempo (segundos)			Porcentaje del verde
		Verde	Amarillo	Rojo	
1	<b>Norte(N)</b>	31	3	51	36
2	<b>Oeste(W)</b>	8	3	74	9
3	<b>Sur(S)</b>	16	3	66	19
4	<b>Este(E)</b>	<b>12</b>	3	70	14

Tabla 7: Fases de un semáforo con ciclo 120 segundos con las fases mejoradas.

Fases No.	Acceso	Tiempo (segundos)			Porcentaje del verde
		Verde	Amarillo	Rojo	
1	<b>Norte(N)</b>	52	3	65	43
2	<b>Oeste(W)</b>	<b>12</b>	3	105	10
3	<b>Sur(S)</b>	<b>23</b>	3	94	19
4	<b>Este(E)</b>	17	3	100	14

De esta manera se logra que las proporciones entre el verde y el tamaño del ciclo sean similares en la fase respectiva. Como se puede observar en la fase Norte hay una diferencia bastante significativa respecto a las otras fases.



### 6.2.5 Elementos geométricos básicos de una rotonda

En la siguiente infografía (Ver figura 20) se muestra un diseño sencillo de una rotonda con las características que se deben tomar en cuenta a la hora del diseño final.

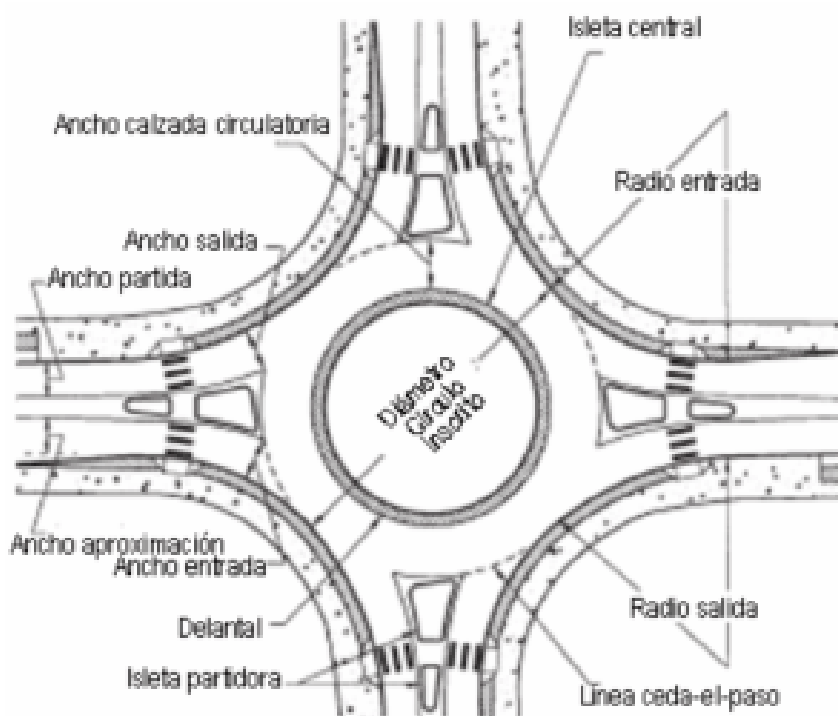


Figura 20: Elementos geométricos básicos de una rotonda

#### Ventajas de la rotonda

- Fluidez al evitar semáforos y esperas largas.
- Colocación de un pequeño parque o área verde en el centro de la rotonda.
- Mejora del ornato, ya que se pueden crear fuentes de agua con una iluminación adecuada, para que al mismo tiempo funcione de iluminación de la rotonda y relajación de ese pequeño recorrido.

### **Desventajas de la rotonda**

- Muchas personas no se familiarizan con las señales.
- En intersecciones con alto tráfico se vuelve un caos si éstas son muy pequeñas.
- Estar muy atento a conductores imprudentes, que no conocen cómo se debe circular adecuadamente en las mismas puede producir un alto estrés de muchos al tratar de ingresar a la rotonda.

### **Rotondas de Managua**

En la ciudad capital existen un sin número de rotondas todas las cuales tiene un fin específico el cual es funcionar como intersección, en un punto importante, por tal razón en Managua existen las siguientes rotondas: Universitaria, Centroamérica, El Periodista, El Gueguense, Cristo Rey, Las Américas, Metrocentro, Jean Paul Genie, Bello Horizonte y Santo Domingo.

Estas son algunas de las principales rotondas que se encuentran en la ciudad capital, es importante mencionar que Managua es el departamento con más rotondas en todo el país.

### **Funcionamiento de rotondas**

Cuando los conductores se acercan a la entrada de una rotonda deben tomar dos decisiones básicas: primero, seleccionar el carril apropiado para su destino, y segundo, “ceder el paso” a los que tienen prioridad, es decir a los que circulan por la rotonda. El proceso de toma de decisiones dentro de las rotondas es

generalmente más complejo que para otros tipos de intersecciones, sobre todo porque el conductor no siempre puede ver la salida.

Además, debido a que la intersección es curva, obliga a los conductores a cambiar poco a poco su dirección, lo que podría desorientar a los otros conductores sobre su destino. La decisión de “ceder el paso”, produce una negociación en varios puntos de la rotonda, pese a que está normalmente reglamentada la prioridad. Los conductores deben elegir un intervalo aceptable en el que puedan entrar dentro del flujo conflictivo de la rotonda.

Muchos procedimientos para hacer análisis de capacidad en rotondas se basan en modelos estocásticos. De acuerdo a esto, la capacidad depende de la disponibilidad de los intervalos y la aceptación de éstos por parte de los conductores que ingresan al tránsito de circulación. Según Raff (1950) la corriente principal (en este caso el flujo conflictivo) se puede interpretar como una oferta continua de intervalos que el conductor debe aceptar o rechazar según su criterio personal. En la figura 21 se esquematiza el funcionamiento de una rotonda.

La teoría de aceptación de intervalos fue definida por Harders (Harders, 1968) en Alemania y por Siegloch en 1973 (Siegloch, 1973) y (Troutbeck y Brilon, 1996). Los manuales de capacidad de Alemania, de Estados Unidos de Norteamérica y suizo contemplan este criterio. Esta teoría asume que el comportamiento de los conductores es consistente y homogéneo. Las fuentes consultadas coinciden en que no es posible medir directamente los intervalos críticos, sólo se puede observar un conductor, aceptando o rechazando intervalos. Bajo un comportamiento coherente, un intervalo aceptado es una marca superior para el intervalo crítico del conductor.

Las bajas velocidades en una rotonda facilitan este proceso de aceptación (NCHRP 672, 2010). La eficiencia en la operatividad de las rotondas es mayor cuando las velocidades de circulación son menores. Este fenómeno se debe a que si el tránsito circulante es más rápido, los intervalos serán más pequeños para que el tránsito que entra los pueda aceptar cómodamente, es decir, puedan acelerar e ingresar al mismo. De esta forma habrá una menor cantidad de intervalos aceptables con un mayor número de vehículos acumulados en la entrada, lo que se traduce en demora para entrar a la rotonda.

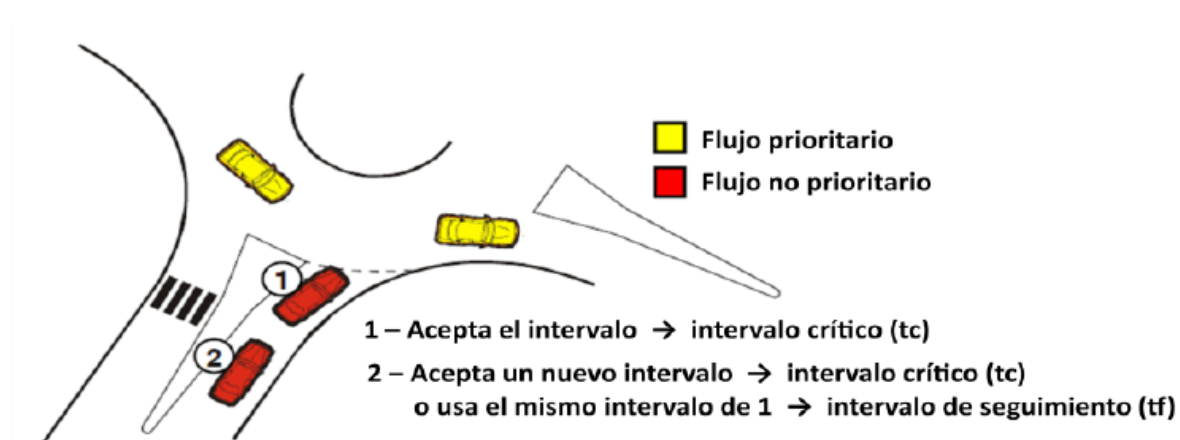


Figura 21: Funcionamiento de una rotonda

### Capacidades de las rotondas

Cuando el volumen conflictivo se aproxima a cero, el máximo volumen de entrada está dado por 3.600 segundos por hora dividido por el intervalo de seguimiento, lo que es análogo al flujo de saturación para un movimiento que recibe verde en una intersección señalizada (NCHRP-572, 2007).

En resumen, el rendimiento operativo de rotondas depende, por un lado, del comportamiento de los conductores al disponer intervalos en la corriente conflictiva. Por otro lado, al igual que otras intersecciones, su operación está influenciada por su geometría (número de carriles, ancho de entradas, diámetro, etc.).

El modelo propuesto para rotondas (NCHRP-572, 2007)  $c = Ae^{-Bvc}$  con estimaciones de los parámetros A y B sobre la base de teoría de la aceptación de intervalos en función de los intervalos crítico y de seguimiento como se muestra en las ecuaciones  $A = \frac{3600}{t_f}$  y  $B = \frac{t_c - t_f/2}{3600}$ . El parámetro A que afecta a la exponencial depende solamente del valor del intervalo de seguimiento, en cambio el parámetro B también depende del valor del intervalo crítico.

### 6.2.6 Tráfico

Tráfico es un concepto que tiene su origen en un vocablo italiano y que se refiere al tránsito o desplazamiento de medios de transporte, seres humanos u objetos por algún tipo de camino o vía. El concepto de tráfico puede hacer mención tanto a la acción del movimiento como a las consecuencias de dicha circulación.

### 6.2.7 Congestión vehicular

La palabra “congestión” se utiliza frecuentemente en el contexto del tránsito vehicular, tanto por técnicos como por los ciudadanos en general. El diccionario de la Lengua Española (Real Academia Española, 2001) la define como “acción y efecto de congestionar o congestionarse”, en tanto que “congestionar” significa “obstruir o entorpecer el paso, la circulación o el movimiento de algo”, que en nuestro caso es el tránsito vehicular.

Habitualmente se entiende como la condición en que existen muchos vehículos circulando y cada uno de ellos avanza lenta e irregularmente. Estas definiciones son de carácter subjetivo y no conllevan una precisión suficiente.

### **6.2.8 Explicación teórica del congestionamiento**

La causa fundamental de la congestión es la fricción entre los vehículos en el flujo de tránsito. Hasta un cierto nivel de tránsito, los vehículos pueden circular a una velocidad relativamente libre, determinada por los límites de velocidad, la frecuencia de las intersecciones, etc. Sin embargo, a volúmenes mayores, cada vehículo adicional estorba el desplazamiento de los demás, es decir, comienza el fenómeno de la congestión. Entonces, una posible definición objetiva sería: “La congestión es la condición que prevalece si la introducción de un vehículo en un flujo de tránsito aumenta el tiempo de circulación de los demás” A medida que aumenta el tránsito, se reducen cada vez más fuertemente las velocidades de circulación. (Thomson & Bull, 2002)

### **6.2.9 Causas de la congestión**

Aparte del tema en estudio que es el correcto funcionamiento de los semáforos hay algunas causas que contribuyen a que haya más congestionamiento en las calles como son:

#### **Características del transporte urbano que provocan la congestión**

El sistema de transporte, incluyendo la provisión de suelo urbano para infraestructura de transporte, se desenvuelve bajo características propias muy particulares, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

— La demanda de transporte es “derivada”, es decir, pocas veces los viajes se producen por un deseo intrínseco de desplazarse; generalmente, obedecen a la necesidad de acceder a los sitios en que se llevan a cabo las distintas actividades (como el trabajo, las compras, el estudio, la recreación, el descanso, etc.), todas las cuales se realizan en lugares diferentes.

— La demanda de transporte es eminentemente variable y tiene puntas muy marcadas en las cuales se concentran muchos viajes, a causa del deseo de aprovechar en buena forma las horas del día para realizar las distintas actividades y para tener oportunidad de contacto con otras personas.

— El transporte se efectúa en limitados espacios viales, los que son fijos en el corto plazo; como es fácil de comprender, no se puede acumular la capacidad vial no utilizada para usarla posteriormente en períodos de mayor demanda.

— Las opciones de transporte que presentan las características más apetecidas, es decir, seguridad, comodidad, confiabilidad, autonomía, como es el caso del automóvil son las que hacen un mayor uso del espacio vial por pasajero

— Especialmente en zonas urbanas, la provisión de infraestructura vial para satisfacer la demanda de los períodos de punta tiene un costo muy elevado.

— A raíz de todo lo anterior se produce congestión en diversos lugares, con sus negativas secuelas de contaminación, importante gasto de los recursos privados y sociales, y pérdida de calidad de vida.

### **6.2.10 El problema es creado principalmente por los automóviles**

Algunos vehículos generan más congestión que otros. En la ingeniería de tránsito cada tipo de vehículo tiene asignada una equivalencia en una unidad de vehículos de pasajeros denominada pcu (passenger car unit). Un automóvil tiene una equivalencia de 1 pcu, y los demás vehículos una equivalencia que corresponde a su influencia perturbadora sobre el flujo de tránsito, o el espacio vial que efectivamente ocupan, en comparación con la de un automóvil. Normalmente, se

considera que un bus tiene una equivalencia aproximada de 3 pcu, y un camión, una de 2 pcu. Estrictamente, el factor pcu varía según se trate de una aproximación a una intersección o de un tramo vial entre intersecciones.

Aunque el bus genera más congestión que el automóvil, generalmente transporta más personas. Si el primero lleva 50 pasajeros y el segundo transporta en promedio 1.5 persona, entonces cada ocupante del automóvil produce 11 veces la congestión atribuible a cada pasajero del bus. Por lo tanto, a igualdad de otras condiciones, la congestión se reduce si aumenta la participación de los buses en la partición modal de los viajes.

### **La condición de las vías y las prácticas de conducta contribuyen a la congestión.**

- a) La vialidad de las ciudades: problemas de diseño y conservación
- b) Las conductas de los conductores muestran poco respeto por quien comparten las vías.
- c) La información disponible sobre las condiciones del tránsito es deficiente.

(Thomson & Bull, 2002)

### **Consecuencias del congestionamiento**

Como consecuencias podemos destacar las siguientes:

- Perdidas del tiempo de los automóviles y pasajeros. Como una actividad no productiva para la mayoría de las personas, reduciendo la salud económica regional.



- Retrasos, lo cual puede resultar en la hora atrasada de llegada para el empleo, las reuniones, y la educación lo que al final resulta en pérdida de negocio, medidas disciplinarias u otras pérdidas personales.
- Incapacidad para predecir con exactitud el tiempo de viaje, lo que lleva a los conductores la asignación de más tiempo para viajar “por si acaso” y menos en actividades productivas.
- Desperdicio de combustible, aumenta la contaminación en el aire y las emisiones de dióxido de carbono (que puede contribuir al calentamiento global) debido al aumento de ralentización, aceleración y frenado.
- El desgaste de los vehículos como consecuencia de la ralentización en el tráfico y la frecuencia de aceleración y frenado, lo que hace más frecuente que se produzcan reparaciones y remplazos.
- Automovilistas frustrados, el fenómeno de la ira de carretera y la reducción de la salud de los automovilistas.
- Emergencias: si se bloquea el tráfico esto podría interferir con el paso de los vehículos de emergencia para viajar a sus destinos en los que se necesitan con urgencia. (Morales & Gonzales, 2013)

### **6.2.11 Accidentes automovilísticos**

Un accidente de tráfico, accidente de tránsito, accidente vial o siniestro automovilístico es un suceso imprevisto y ajeno al factor humano que altera la marcha normal o prevista del desplazamiento en las vialidades. Especialmente es

aquel suceso en el que se causan daños a una persona o cosa, de manera repentina ocasionada por un agente externo involuntario.

El perjuicio ocasionado a una persona o bien material, en un determinado trayecto de movilización o transporte, debido (mayoritaria o generalmente) a factores externos e imprevistos que contribuyen la acción riesgosa, negligente o irresponsable de un conductor, de un como pueden ser fallos mecánicos repentinos, condiciones ambientales desfavorables (sismos o cambios climáticos bruscos y repentinos) y cruce de animales durante el tráfico o incluso la caída de un árbol por fuertes vientos en la calle o carretera.

Siempre hay una causa desencadenante que produce un hecho vial, que se puede agravar de forma considerable si por él resultan afectadas otras personas, además de la persona que lo desencadena. Asimismo, un accidente puede verse agravado si no se ha hecho uso adecuado de los medios preventivos que no lo evitan, pero reducirían su gravedad. (Wikipedia, Wikipedia, s.f.)

### **Emisiones de dióxido de carbono CO<sub>2</sub>**

Las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) provocan un exceso de gases de efecto invernadero tal que solo si lo frenamos a tiempo podremos detener sus nefastas consecuencias. Pero, si bien es cierto que el hombre está contribuyendo en gran medida a aumentar el CO<sub>2</sub> que existe en la atmósfera, existen fuentes naturales de emisión de CO<sub>2</sub>.

Hoy, una de las huellas de carbono más profundas proviene del transporte de mercancías y personas. El coche, el avión, el transporte por carretera, ferroviario y marítimo, entre otros tipos de transporte, son grandes emisores de CO<sub>2</sub>, si bien algunos lo son más que otros, en especial en transporte aéreo o por carretera. (Verde, s.f.)

## **Manual de capacidad de carreteras HCM**

El objetivo de un Estudio de la Circulación es el de conocer de antemano el comportamiento de una carretera o un tramo de ella, con condiciones de circulación prefijadas y reales, para determinar los diferentes regímenes de explotación y con el objetivo principal de conseguir que la circulación de personas y mercancías sea segura, eficiente y económica.

En la Ingeniería de Tráfico (1930), el objetivo principal es el de mejorar la explotación de las redes viales existentes, empleándose posteriormente para la planificación y el proyecto de nuevas vías.

En Ingeniería de Tráfico existen diversos métodos empíricos de análisis que en función de las características de la carretera permiten conocer la capacidad de la misma. De ellos, el principal método es el Manual de Capacidad de Carreteras HCM (Highway Capacity Manual).

El Manual de Capacidad de las Carreteras (HCM) determina la capacidad y los niveles de servicio en condiciones ideales y, posteriormente, estas variables se adaptan en función de las discrepancias que existan entre éstas condiciones y las características propias del tramo real de la carretera estudiada o proyectada.

### **Se entiende por Condiciones Ideales:**

- ✓ Carriles con anchura de 3.6 m
- ✓ Arcenes de anchura 1.8 m
- ✓ Sin obstáculos laterales en los márgenes
- ✓ Circulación exclusiva de vehículos de tipo turismo
- ✓ Terreno llano

- ✓ Sin prohibición de adelantamiento
- ✓ Sin accesos que interrumpan la circulación

El Manual de Capacidad de Carreteras HCM proporciona prácticas e investigaciones del transporte con un sistema consistente de técnicas para la evaluación de la capacidad y determinar el nivel de servicio en carreteras y calles.

Sus objetivos incluyen proporcionar un juego lógico de métodos para evaluar las facilidades del transporte, asegurando que los practicantes tengan un acceso a los resultados de la investigación actualizada.

Sin embargo, este manual no establece una norma legal para diseño o construcción de carreteras. El manual es la fuente primaria documental que refleja hallazgos de la investigación en capacidad y calidad de servicio y presenta métodos para analizar los funcionamientos de las calles, carreteras, el peatón y la bicicleta.

**Tres parámetros básicos pueden ser utilizados para describir el tráfico en cualquier carretera:**

- a) Volumen o flujo
- b) Velocidad
- c) Densidad

**El Manual de Capacidad de Carreteras 2,000 (HCM 2.000) divide el tráfico en dos situaciones:**

- a) el flujo ininterrumpido
- b) el flujo interrumpido

Para sincronizar de forma óptima los ciclos de los semáforos, se han empleado diversas técnicas matemáticas que van desde la programación matemática con restricciones de equilibrio [de Schutter, B. y de Moor, B. (1998)] útiles para la realización de análisis estratégicos del tráfico, hasta las técnicas de optimización aplicadas a modelos de simulación Wiering, et al. (2004).

En ingeniería de tránsito, la medición básica más importante es el conteo o aforo, ya sea de vehículos, ciclistas, pasajeros y/ o peatones. Los conteos se realizan para obtener estimaciones de:

- **Volumen**
- **Tasa de flujo**
- **Demanda**
- **Capacidad**

Estos cuatro parámetros se relacionan estrechamente entre si y se expresan en las mismas unidades o similares, sin embargo, no significan lo mismo.

El **Volumen** es el número de vehículos (o personas) que pasan por un punto durante un tiempo específico.

La **tasa de flujo  $q$** , es la frecuencia a la cual pasan los vehículos (o personas) durante un tiempo específico menor a una hora, expresada como una tasa horaria equivalente. Se calcula

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

Donde:

$N$  = es el número de vehículos

$T$  = el tiempo específico, inferior a una hora expresada en (Veh/minutos) o Vehículos por segundo (Veh/s).

La **demanda** es el número de vehículos (o personas) que desean viajar y pasan por un punto durante un tiempo específico. Donde existe congestión, la demanda es mayor que el volumen actual, ya que algunos viajes se desvían hacia rutas alternas y otros simplemente no se realizan debido a las restricciones del sistema vial.

La **capacidad** es el número máximo de vehículos que pueden pasar por un punto durante un tiempo específico.

**Volumen de tránsito** se define como el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados, de un carril o de una calzada, durante un periodo determinado, y se expresa como:

$$Q = \frac{N}{T}$$

Donde:

$Q$  = Vehículos que pasan por unidad de tiempo (vehículos/periodo)

$N$  = Número total de vehículos que pasan (vehículos)

$T$  = Periodo determinado (unidades de tiempo)

**Volumen horario de máxima demanda (VHMD):** es el máximo número de vehículos que pasan por un punto o sección de un carril o de una calzada durante 60 minutos consecutivos. Es el representativo de los periodos de máxima demanda que se pueden presentar durante un día en particular.

**Factor de la hora máxima demanda FHMD:** es la relación entre el volumen horario de máxima demanda **VHMD**, y el volumen máximo  $Q_{m\acute{a}x}$ , que se representa durante un periodo dado dentro de dicha hora. Matemáticamente se expresa:

$$FHMD = \frac{VHMD}{N(Q_{m\acute{a}x})}$$

Donde:

$N$  = Número de periodo durante la hora de máxima demanda

Los periodos dentro de la hora de máxima demanda pueden ser de 5, 10 ó 15 minutos, utilizándose éste último con mayor frecuencia, en cuyo caso el factor de la hora de máxima demanda es:

$$FHMD = \frac{VHMD}{4(Q_{m\acute{a}x})}$$

El factor de la hora de máxima demanda es un indicador de las características del flujo de tránsito en periodos máximos. Indica la forma como están distribuidos los flujos máximos dentro de la hora. Su mayor valor es la unidad, lo que significa que existe una distribución uniforme de flujos máximos durante toda la hora. Valores bastante menores que la unidad indican concentraciones de flujos máximos en periodos cortos dentro de la hora.

En el estudio de volumen de tránsito existen diversas formas para obtener los recuentos de los volúmenes de tránsito, para lo cual se ha generalizado el uso de aparatos de medición de diversa índole. Estas formas incluyen: los aforos manuales a cargo de personas, las cuales son particularmente útiles para conocer el volumen de movimientos direccionales en intersecciones. Los volúmenes por carriles individuales y la composición vehicular.

## VII. HIPOTESIS

A partir del año 2005 se iniciaron una serie de tutorías en la carrera de Ingeniería Industrial en el área de Teoría de Colas, por ejemplo un trabajo titulado, “**Aplicación de la teoría de líneas de espera al proceso de pollos industrial de la empresa de pollos Indavisa-Pollos Real**” fue publicado en el XV Simposio Internacional de Métodos Aplicados a las Ciencias, posteriormente se realizó otro similar en la empresa Kola Shaler Industrial S.A., es una industria que elabora bebidas carbonatadas desde hace más de un siglo en Nicaragua.

Durante este periodo se logró identificar un trabajo de investigación en un semáforo ubicado en Villa Fontana (Enitel), donde se aplicó este mismo método para revisar los flujos vehiculares para lograr un mejor desempeño del semáforo. Sin embargo el proceso aplicado consideraba los dos procesos aleatorios, el objetivo era considerar un estudio pero considerando el tiempo del semáforo determinista, por tal razón se realizó un estudio tomando como referencia la base de datos que se utilizó en este mismo semáforo para revisar el comportamiento que tenía el semáforo integrando este nuevo sistema para los tiempos, estos resultados fueron publicados en el *XVIII SIMMAC*. (Mendoza & Marín, 2012), este se trabajó en conjunto con la maestra Pilar Marín, ya que ella facilitó la base de datos.

La idea será describir una estrategia para **optimizar el flujo vehicular para cada una de las fases de un semáforo considerando en primer lugar las llegadas de forma estocástica y los tiempos de las fases del semáforo de manera determinística**, logrando así establecer por simulación los tiempos de las fases adecuados para minimizar el tiempo de ciclo en el semáforo e integrar las rotondas como semáforos cuyos verdes efectivos estén relacionados con los verdes de cada semáforo en su fase respectiva.



El objetivo de estudiar los tiempos de los ciclos de dos semáforos es para ampliar estos conocimientos para revisar los semáforos que están actualmente en serie para lograr la coincidencia de los tiempos verdes en un mayor porcentaje durante la hora de máxima demanda. Por otro lado, se ha logrado encontrar empíricamente que cuando los tiempos de los ciclos son múltiplos de un número determinando la coincidencia de los ciclos aumenta, esto se logró verificar con la investigación anterior. (Mendoza, 2017)

El problema de relacionar dos o más semáforos como lo menciona Fernández (2014), "no ha sido planteado analíticamente ya que es de extraordinaria complejidad matemática" (Fernández Aguilera, 2014).

Muy poco se ha encontrado en la literatura acerca de encontrar relaciones entre los tiempos de los semáforos. "La determinación del tiempo de ciclo óptimo para una red de semáforos coordinados, es un problema para el que no se dispone aún de una formulación analítica" ( Barrientos Ruiz & Fernández Koprach, 1989)

Cabe citar aquí a Lazo, Leonardo y Sánchez, Gilberto (1981), donde mencionan que "generalmente todos los semáforos dentro de un mismo sistema deberán tener igual longitud. Sin embargo, condiciones especiales tales como la longitud ente semáforos, las velocidades que se desarrollan entre ellos, puede hacer deseable que las longitudes del ciclo en semáforos determinados sean múltiplos o submúltiplos de la longitud del ciclo predominante" (Lazo Margáin & Sánchez Ángeles, 1981).

El enfoque tradicional se basa en la minimización de las demoras a los vehículos de los movimientos críticos, basadas en (Webster, 1958). No obstante, existen algunas objeciones al criterio de minimización de demoras a los vehículos que pueden plantearse. La primera en relación con la no-consideración de las demoras a los

usuarios, sólo de los vehículos. Otra objeción en relación con el consumo de combustible y que se relaciona con el número de detenciones. Estas están también relacionadas con los accidentes, especialmente con los choques por detrás. Luego, una función compuesta de demoras y detenciones propuesta por Akcelik en su modelo *SECUENCIAL* (Gómez Restrepo, 2005)

La pregunta es entonces, ¿Cómo se puede establecer una sincronización entre los tiempos de los ciclos de los cinco semáforos ubicados en los alrededores de las rotondas Centroamérica y Jean Paul para calcular un ciclo común que permita agilizar la circulación y mejorar la operatividad global entre ellas?

¿Qué característica debe presentar el ciclo común que relaciona la rotonda Centroamérica con los semáforos cercanos?

¿Qué característica debe presentar el ciclo común que relaciona la rotonda Jean Paul Genie con los semáforos cercanos?

## VIII. DISEÑO METODOLOGICO

El diseño de la investigación según el último reglamento aprobado del Sistema de Estudios de Posgrado y Educación Continua SEPEC –UNAN Managua (2011), (artículo 94) pertenece al área de Ciencias Exactas Ingeniería y Tecnología. Es Analítico de corte transversal, ya que la información requerida para el estudio proviene de un momento único en el tiempo, es decir durante un periodo de forma aleatoria a la hora de máxima demanda se utilizarán aforos vehiculares para lograr establecer las relaciones entre dos semáforos a través de simulaciones para establecer el modelo matemático que los relacione.

En esta investigación una **coincidencia** será cuando en un inicio los semáforos  $S_1$  con ciclo  $C_1$  y  $S_2$  con ciclo  $C_2$  tienen un arranque común para los tiempos verdes en una misma fase (Ver figura 22). En esta situación en ambos semáforos  $S_1$  y  $S_2$ ,  $T_1$  está verde y  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  permanecen en rojo, por tanto, los coches del carril  $L_1$  rebasan el cruce, continuando de frente o girando a la izquierda en ambos casos.

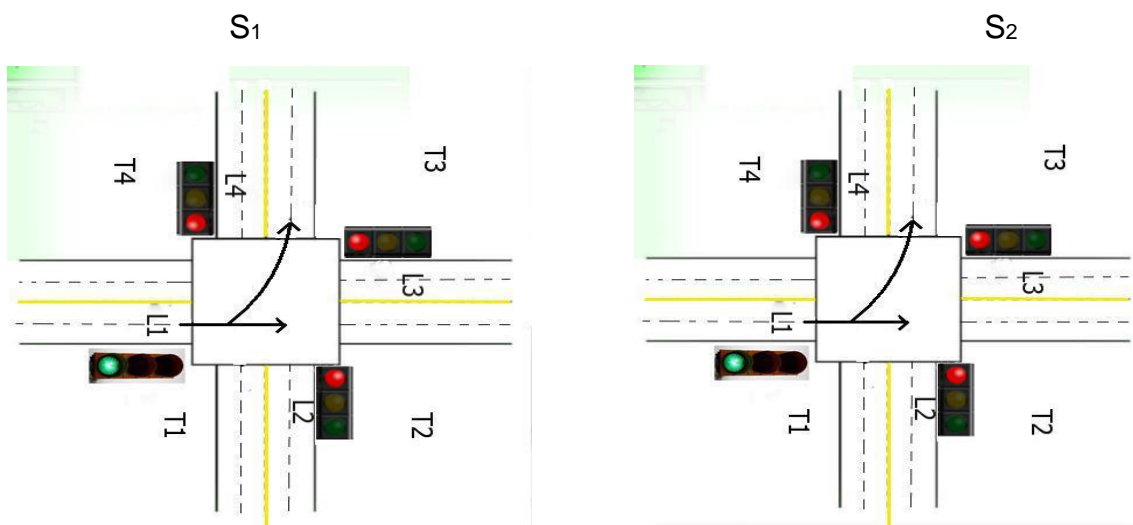


Figura 22: Existe coincidencia del tiempo verde en la fase dada.

En la figura 23, las fases de los semáforos  $S_1$  y  $S_2$  no tienen los tiempos verdes en común en la misma fase después de haber transcurrido varias veces sus ciclos respectivos, lo cual ocurre muchas veces si los tiempos no tienen relación. En el semáforo  $S_1$ , T1 está verde y T2, T3 y T4 permanecen en rojo, por tanto los coches del carril L1 rebasan el cruce, continuando de frente o girando a la izquierda, para el semáforo  $S_2$ , T2 y T4 están en verde mientras T1 y T3 permanecen en rojo, por tanto los coches del carril L2 y L4 rebasan en ambas direcciones haciendo también para el caso L2 un giro a la derecha en el cruce.

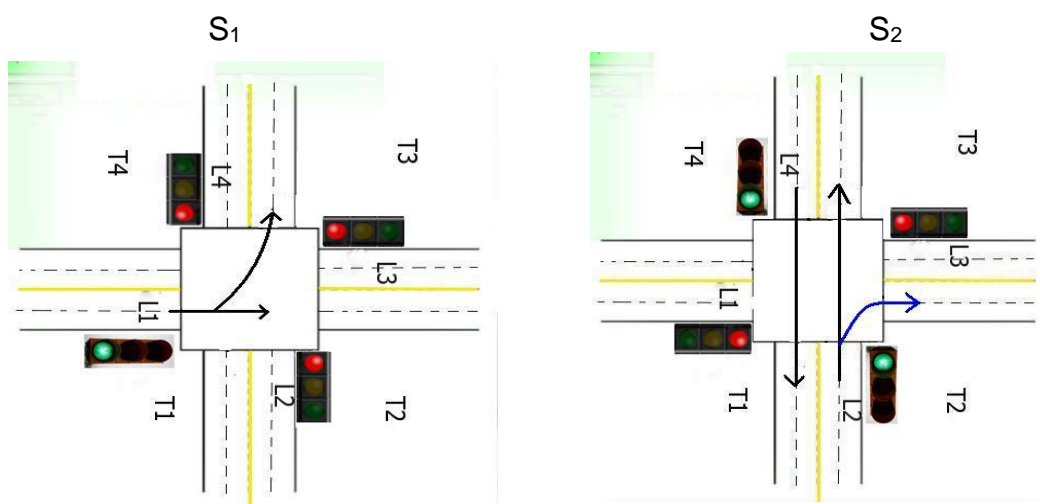


Figura 23: No existe coincidencia del tiempo verde en la fase dada.

Para lograr el mayor número de coincidencias en dos semáforos seleccionados se realizará lo siguiente:

Primero para obtener la información adecuada para la investigación hay que definir la población y muestra del estudio. La población son todos los peatones y conductores que hacen uso de las rotondas y semáforos existentes en las 153 intersecciones, 52 de estas con dispositivos inteligentes que fueron instalados en 2015, cuando la municipalidad inició el proyecto de reemplazo de los dispositivos análogos por digitales.

Para lograr un control adecuado en las intersecciones donde se necesita una regulación por medio de semáforo se utilizó el método Webster. Esta metodología, utiliza los flujos de saturación en cada fase del mismo, para determinar un ciclo mínimo de funcionamiento.

Para sincronizar de forma óptima los ciclos de los semáforos, se han empleado diversas técnicas matemáticas que van desde la Programación Matemática con restricciones de equilibrio (de Schutter, B. y de Moor, B.1998) útiles para la realización de análisis estratégicos del tráfico, hasta las técnicas de optimización aplicadas a modelos de simulación (Wiering, et al. (2004).

Para obtener una medida de esta relación se diseñó un programa, según el *algoritmo heurístico* descrito en la página 37, que determina el óptimo de todas las combinaciones posibles dentro de los rangos de dos ciclos dados. Este valor será el número entero de segundos en el cual los dos ciclos  $C_1$  y  $C_2$  tienen una primera coincidencia, lo que se requiere es que esta frecuencia sea mayor. Relacionar los ciclos de ésta manera durante del periodo de máxima demanda permite alcanzar un número de coincidencias máximo.

Luego a través del siguiente modelo matemática de Programación Lineal Entera se verificará su funcionalidad.

## 8.1 Construcción del Modelo Matemático propuesto para revisar dos semáforos

*Función Objetivo:* **Minimizar**  $z=m+n$ , donde m y n son factores enteros.

Las restricciones del modelo son: el Desfase de los semáforos, las Coincidencias, los múltiplos del ciclo 2 y los múltiplos de ciclo 1.

*Restricciones:*

1. **Desfase:** Se logra igualando los tiempos de los dos semáforos cuya representación se da a través de las sucesiones aritméticas del semáforo S<sub>1</sub> con ciclo C<sub>1</sub> y el semáforo S<sub>2</sub> con ciclo C<sub>2</sub> junto con el desfase (Ver figura 24), obteniéndose la siguiente relación:

$$mC_2 - nC_1 \leq D + (C_2 - C_1) \quad (\text{desfase})$$



Figura 24: Desfase calculado entre los semáforos **Club Terraza y Galerías**.

## 2. Coincidencia por fase

En este caso se igualan los tiempos de las representaciones de las sucesiones aritméticas del semáforo  $S_1$  con ciclo  $C_1$  y el semáforo  $S_2$  con ciclo  $C_2$  suponiendo que parten al mismo tiempo, obteniéndose la relación:

$$mC_2 - nC_1 \geq 0 \text{ (coincidencia)}$$

3. **Número de veces que el ciclo  $C_2$  debe multiplicarse** para lograr el MCM  $(C_2, C_1)$  óptimo (ver anexo 2) el cual se calcula por medio de un programa preparado para este fin, de donde se obtiene:

$$mC_2 \geq \text{MCM } (C_2, C_1) \text{ óptimo.}$$

4. **Número de veces que el ciclo  $C_1$  debe multiplicarse** para lograr el MCM  $(C_2, C_1)$  óptimo (ver anexo 2) el cual se calcula por medio de un programa preparado para este fin, de donde se obtiene:

$$nC_1 \geq \text{MCM } (C_2, C_1) \text{ óptimo.}$$

Por lo tanto el modelo general de PLE a evaluar es el siguiente:

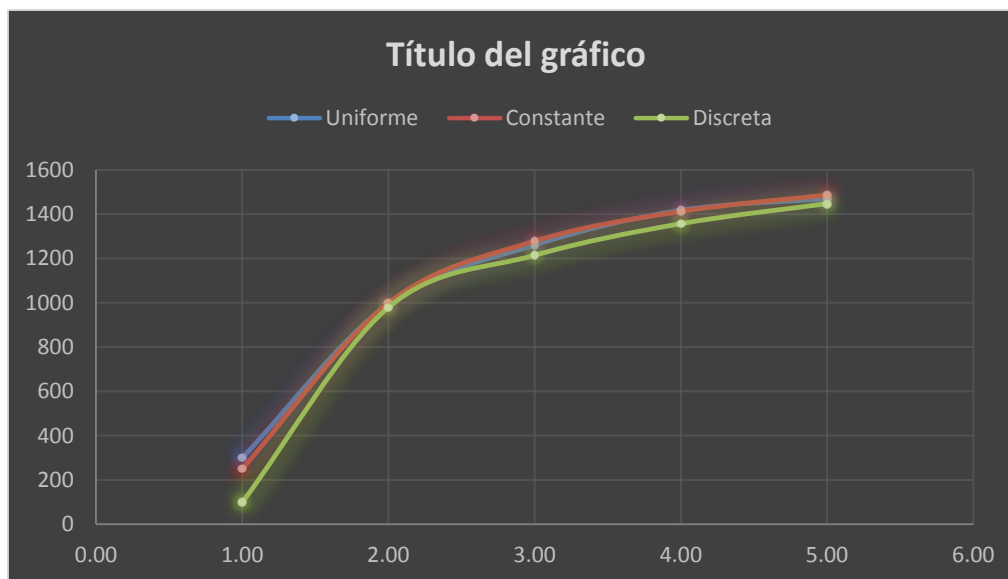
### Modelo Matemático propuesto

<b>Minimizar</b>	$z = m + n$	
<b>Sujeto a:</b>	$mC_2 - nC_1 \leq D + (C_2 - C_1)$	<b>(Desfase)</b>
	$mC_2 - nC_1 \geq 0$	<b>(Coincidencia)</b>
	$mC_2 \geq \text{MCM } (C_2, C_1) \text{ óptimo.}$	<b>(Número de ciclos <math>C_2</math>)</b>
	$nC_1 \geq \text{MCM } (C_2, C_1) \text{ óptimo.}$	<b>(Número de ciclos <math>C_1</math>)</b>
	$m$ y $n$ enteros positivos	

## 8.2 Simulación por el programa WinQSB del óptimo encontrado.

La metodología utilizada en este estudio permitió visualizar algunas dificultades presentes en otros semáforos sobre todo a la hora pico, estos resultados fueron publicados en el *XVIII SIMMAC*, Simposio Internacional de Métodos Matemáticos Aplicados a las Ciencias, 2012. Aquí se consideró la distribución para el servicio Constante.

Basado en este antecedente, en este estudio se utilizó como distribución de servicio la *Uniforme Discreta*, la cual permitió considerar los porcentajes de verde y rojo y el número de segundos del ciclo respectivo, además de las fases del semáforo. En la figura 25, se realizó una comparación de la distribución Constante, Uniforme continua y la Uniforme Discreta a través de simulaciones, la distribución seleccionada refleja los mínimos tiempos de espera en todos los escenarios propuestos de llegadas.



**Figura 25: Comparación de la distribución Uniforme, Constante y Discreta.**



De acuerdo a lo anterior y para verificar la efectividad del modelo óptimo respecto al original se realizaron simulaciones por el WinQSB del modelo original y el óptimo, utilizando un modelo de líneas de espera (G/G/2) donde el servicio sigue una distribución Discreta y las llegadas una distribución de Poisson. Para efectos comparativos, primero se realizó la simulación para el modelo original y después para el óptimo.

También se realizaron simulaciones para evidenciar la mejor proporción del *tiempo del verde* del semáforo con ciclo 120 segundos y por otro lado para verificar la baja funcionalidad de los ciclos largos.

Esta metodología se aplicaría a la fase Norte-Sur de las rotondas propuestas tomando como se había mencionado anteriormente la relación entre ellas como semáforos, la cual permitiría minimizar los recorridos sobre esta red de semáforos.

### **8.3 Ciclos propuestos para las rotondas Jean Paul Genie y Centroamérica**

Ciclo propuesto para la rotonda Jean Paul Genie según los semáforos Galerías y Las Colinas

En la Tabla 8, se presentan los posibles tiempos de verde efectivo, amarillo y rojo para cada una de las fases de la rotonda Jean Paul Genie. Se puede observar que el semáforo, con ciclo 120 segundos, ubicado en Galerías está relacionado con la rotonda Jean Paul en la dirección Oeste (W), con un verde efectivo de 35 segundos. En la fase Sur (S) está relacionado con el semáforo ubicado en la primera entrada a Las Colinas, con ciclo 130 segundos, con un verde de 45 segundos y en la fase Norte (N) con la rotonda Centroamérica.

Tabla 8: Tiempos de verde efectivo en cada fase en la rotonda Jean Paul Genie.

Relación con:	Acceso	Tiempo (segundos)			
		Verde	Amarillo	Rojo	Total
R CA	Norte(N)	x	3	y	x+y+3
S Galerías	Oeste(W)	35	3	82	120
S Las Colinas	Sur(S)	45	3	82	130
No tiene	Este(E)	-	-	-	

El tiempo total del ciclo buscado para la rotonda Jean Paul debe estar entre 120 y 130 segundos según los ciclos de los semáforos más cercanos. Con respecto a la otra rotonda este tiempo debe ser al menos igual al de la otra rotonda ya que están muy cercanas (aproximadamente 1 km)

Ciclo propuesto para la rotonda Centroamérica según los semáforos Edificio Pellas, La Salle y Farmacia Vida.

Similarmente, en la Tabla 9 se presenta los posibles tiempos de verde efectivo, amarillo y rojo para cada una de las fases de la rotonda Centroamérica. Se puede observar que el semáforo, con ciclo 120 segundos, ubicado en Edificio Pellas está relacionado con la rotonda en la dirección Norte (N) con un verde efectivo de 35 segundos. En la fase Oeste (W) con el semáforo de la Salle con un ciclo de 125 segundos, en la fase Sur (S) está relacionado con la rotonda Jean Paul Genie y por último en la fase Este (E) con el semáforo de la Farmacia Vida con ciclo 90 segundos, con un verde de 25 segundos .

Tabla 9: Tiempos de verde efectivo en cada fase en la rotonda Centroamérica

Relación con:	Acceso	Tiempo (segundos)			
		Verde	Amarillo	Rojo	Total
S Edif. Pellas	<b>Norte(N)</b>	35	3	82	120
S La Salle	<b>Oeste(W)</b>	45	3	77	125
R JP	<b>Sur(S)</b>	x	3	y	x+y+3
Farm. Vida	<b>Este(E)</b>	25	3	62	90

De manera similar el tiempo total del ciclo para la rotonda Centroamérica debe estar entre 90 y 125 segundos según los ciclos de los semáforos más cercanos, este tiempo debe ser al menos igual al de la otra rotonda por las características geométricas que presentan.

Para encontrar los valores enteros positivos desconocidos x, que representa los tiempos en segundos para el verde e y los tiempos en segundos para el color rojo se planteó un modelo matemático de Programación Lineal Entera como sigue:

### **Modelo matemático de Programación Lineal Entera para encontrar la mejor relación entre los ciclos de los semáforos**

Función Objetivo: Maximizar  $z = x + y$

Restricciones

$x + y \leq 127$  Rotonda Centroamérica fase norte (ciclo máximo 130, Tabla 8)

$x + y \geq 117$  Rotonda Jean Paul Genie fase sur (ciclo mínimo 120, Tabla 9)

$y \geq 82$  Color rojo mínimo (Tabla 8 y 9)

$35 \leq x \leq 45$  Color verde mínimo (Tabla 8 y 9)

x e y tiempo entero en segundos

## Procesamiento de la información

Se utilizó programas computacionales para hacer este trabajo, uno de ellos fue Microsoft Word 2016 con el cual se redactó el trabajo y se utilizó el Software WinQSB y Mac 1.0.4 para hacer la simulación del semáforo y las rotondas.

También se realizaron visitas a los responsables de la Policía Nacional de Tránsito y obtener información acerca del tema mediante una entrevista no dirigida y también buscar tutoriales que ayudarán a hacer mejor uso del software.

**Tabla 10: Operacionalización de Variables**

Objetivos Específicos	Variable	Definición de la Variable	Indicador	Fuente	Técnica
<b>Analizar la situación actual de los semáforos en estudio y su relación con las rotondas Centroamérica y Jean Paul en términos de sus fases y ciclos comunes.</b>	Ciclos de los dos semáforos y rotondas.	Presentar los valores que presenten las coincidencias de los dos semáforos y rotondas.	Tiempo Mínimo	Ingeniería de tránsito.	Observación y uso de Software WinQSB y Mac 1.0.4
<b>Seleccionar los elementos más importantes para hacer una propuesta entre las fases de los semáforos y ciclos de las rotondas Centroamérica y Jean Paul que permitan agilizar la circulación y mejorar la operatividad entre ellas.</b>	Normas Red de los semáforos.	Descripciones técnicas detalladas, elaboradas con el fin de garantizar la relación entre los semáforos y rotondas.	Mínimo en la red	Ingeniería de tránsito	Observación Entrevistas y salida de programas
<b>Hacer una valoración sobre esta relación por medio del cálculo de un ciclo común entre las dos rotondas, Centroamérica y Jean Paul, para verificar las coincidencias con los semáforos en estudio.</b>	WinQSB	Es un software que se utiliza para simular situaciones del tráfico	Normal critico Muy critico Demasiado critico	Ingeniería de tránsito. Manuales	Simulación

## IX. RESULTADOS

En la siguiente figura se presenta la ubicación de los semáforos de Galerías y el Club Terraza seleccionados en la primera fase de este estudio, cuyos resultados son utilizados para obtener los ciclos comunes a las rotondas Centroamérica y Jean Paul Genie. Ellos se relacionan solamente en una fase (EO)



Con los tiempos de los ciclos  $C_2=131$  y  $C_1=125$  de los semáforos del Club Terraza y Galerías respectivamente, con el desfase calculado de 79 segundos según la figura 24, se logró estructurar el modelo original de PLE siguiente:

### Modelo original del estudio en semáforos del Club Terraza y Galerías Santo Domingo.

Minimizar  $z=m+n$

Sujeto a:  $131m - 125n \leq 85$  (desfase)

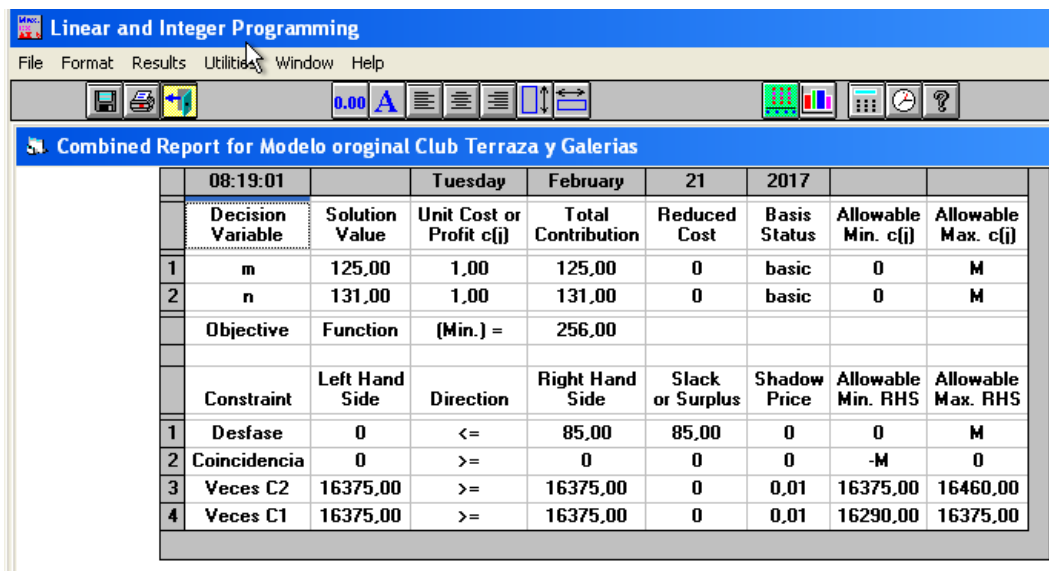
$131m - 125n \geq 0$  (coincidencia)

$131m \geq \text{MCM}(C_2, C_1) = 16375$

$125n \geq \text{MCM}(C_2, C_1) = 16375$

$m$  y  $n$  enteros positivos

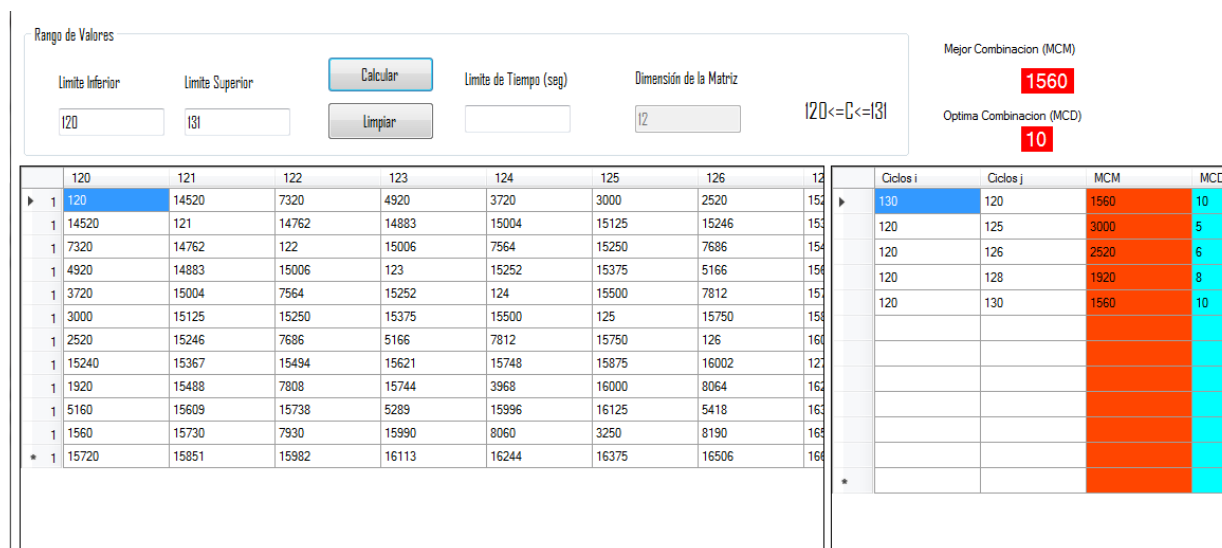
Resolviendo el modelo con el WinQSB (ver anexo 1) por el método de ramificación y acotamiento (B&B) (Taha, 2012), se obtuvo los siguientes resultados que se muestran en la figura 26:



08:19:01 Tuesday February 21 2017								
Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)	
1 m	125.00	1.00	125.00	0	basic	0	M	
2 n	131.00	1.00	131.00	0	basic	0	M	
Objective	Function	(Min.) =	256.00					
Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS	
1 Desfase	0	<=	85.00	85.00	0	0	M	
2 Coincidencia	0	>=	0	0	0	-M	0	
3 Veces C2	16375.00	>=	16375.00	0	0.01	16375.00	16460.00	
4 Veces C1	16375.00	>=	16375.00	0	0.01	16290.00	16375.00	

Figura 26: Solución del modelo original de los semáforos Terraza y Galerías.

Según los tiempos de los ciclos originales se calculó los ciclos óptimos con el programa (ver anexo 2), los cuales se presenta en la figura 27.



**Figura 27: Salida del programa para la combinación de ciclos óptimos.**

Luego de hacer los ajustes de acuerdo a la combinación óptima propuesta de (130, 120) se obtuvo el siguiente modelo:

### Modelo modificado del estudio en semáforos del Club Terraza y Galerías Santo Domingo

Minimizar  $z=m+n$

Sujeto a:  $130m - 120n \leq 89$  (desfase)

$130m - 120n \geq 0$  (coincidencia)

$130m \geq \text{MCM}(C_2, C_1) = 1560$

$120n \geq \text{MCM}(C_2, C_1) = 1560$

$m$  y  $n$  enteros positivos

Resolviendo el modelo con el WinQSB por el método Branch and Bound (B&B) se obtuvo los siguientes resultados que se muestran en la figura 28:

The screenshot shows a software window titled 'Linear and Integer Programming' with a menu bar (File, Format, Results, Utilities, Window, Help) and a toolbar. Below the toolbar is a sub-window titled 'Combined Report for Modelo óptimo semáforo Terraza y Galerías'. The report contains two tables. The first table shows decision variables 'm' and 'n' with their respective values and costs. The second table shows constraints for 'Desfase', 'Coincidencia', and 'N de C' for two locations: 130 and 120.

		10:34:05	Wednesday	September	13	2017		
Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)	
1	m	12,00	1,00	12,00	0	basic	0	M
2	n	13,00	1,00	13,00	0	basic	0	M
Objective		Function	(Min.) =	25,00				
Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS	
1	Desfase	0	<=	89,00	89,00	0	0	M
2	Coincidencia	0	>=	0	0	0	-M	0
3	N de C 130	1560,00	>=	1560,00	0	0,01	1560,00	1649,00
4	N de C 120	1560,00	>=	1560,00	0	0,01	1471,00	1560,00

Figura 28: Solución del modelo óptimo para los semáforos estudiados.

Para verificar la efectividad del óptimo encontrado se realizó una simulación en el WINSQSB para ambas combinaciones, los ciclos originales y lo mejorados. El modelo de simulación de líneas de espera es la siguiente: dos servidores (dos carriles para cada semáforo) con distribuciones de servicio Discreta y llegadas Poisson  $0.85(1/1.18)$  y  $0.90(1/1.11)$  v/s para el semáforo de Galerías y Club Terraza respectivamente como se muestra en la figura 29.

The screenshot shows a software window titled 'Queuing System Simulation' with a menu bar (File, Edit, Format, Solve and Analyze, Results, Utilities, Window, WinQSB, Help) and a toolbar. Below the toolbar is a sub-window titled 'Comparación de dos semáforos'. The main area contains a table with columns for Component Name, Queue Discipline, Queue Capacity, Attribute Value, Interarrival Time Distribution, Batch Size Distribution, and Service Time Distribution. Two specific entries are circled in orange: 'Clientes 1/Discrete/2/1/0.42/3/0.58' and 'Poisson/1.18 Poisson/1.11'.

Component Name	Queue Discipline	Queue Capacity	Attribute Value	Interarrival Time Distribution	Batch Size Distribution	Service Time Distribution
Carril 11						Cientes
Carril 12						Cientes
Carril 21						Cientes
Carril 22						Cientes
Clientes 1				Poisson/1.18		
Clientes 2				Poisson/1.11		
Cola 1	FIFO					
Cola 2	FIFO					

Figura 29: Simulación por el WINQSB de los semáforos para fase O-E



Modelo de simulación para los ciclos originales 125 y 131 segundos.

Las proporciones de verdes utilizados fueron de 52/125 para el ciclo de Galerías y 55/131 para el ciclo del Club Terraza. El resultado se muestra en la figura 30:

11-14-2017	Server Name	Server Utilization	Average Process Time	Std. Dev. Process Time	Maximum Process Time	Blocked Percentage	# Customers Processed
1	Carril 11	75,72%	2,1738	0,9848	3	0,00%	1254
2	Carril 12	76,36%	2,2259	0,9741	3	0,00%	1235
3	Carril 21	79,58%	2,1754	0,9845	3	0,00%	1317
4	Carril 22	80,31%	2,1885	0,9821	3	0,00%	1321
	Overall	77,99%	2,1906	0,9817	3	0,00%	5127
Data	Collection:	0 to	3600	secs	CPU	Seconds =	2,7240

Figura 30: Simulación para los ciclos originales 125 y 131 en la fase O-E

Modelo de simulación para los ciclos óptimos 120 y 130 segundos.

Las proporciones de verdes utilizados fueron de 50/120 para el ciclo de Galerías y 54/130 para el ciclo del Club Terraza. El resultado se muestra en la figura 31:

10-04-2017	Server Name	Server Utilization	Average Process Time	Std. Dev. Process Time	Maximum Process Time	Blocked Percentage	# Customers Processed
1	Carril 11	76,86%	2,1978	0,9802	3	0,00%	1259
2	Carril 12	76,25%	2,1803	0,9836	3	0,00%	1259
3	Carril 21	77,03%	2,1749	0,9846	3	0,00%	1275
4	Carril 22	77,61%	2,2104	0,9776	3	0,00%	1264
	Overall	76,94%	2,1908	0,9816	3	0,00%	5057
Data	Collection:	0 to	3600	secs	CPU	Seconds =	2,7540

Figura 31: Simulación por el WINQSB de los semáforos para fase O-E

Para revisar la efectividad de los ciclos cortos y proporción de verde efectivo se realizó lo siguiente.

*Proporción adecuada del verde efectivo*

En la siguiente tabla 11 se presenta algunas simulaciones realizadas en el WinQSB utilizando Modelos de Líneas de espera General con dos servidores (G/G/2), donde las llegadas siguen una distribución de Poisson y el servicio Discreto, para evidenciar que el *tiempo del verde* del semáforo para un ciclo constante de 120 segundos, a veces cuando esta proporción es muy baja los retardos son mayores como se observa en la proporción 46/120.

Tabla 11: Simulaciones realizadas en el WinQSB con el modelo G/G/2 con ciclo constante variando el verde efectivo. (Tiempos de espera)

Flujos v/s	Discreta(52/120)	Discreta(50/120)	Discreta(48/120)	Discreta(46/120)
1.00	99	168	188	232
2.00	979	1014	971	1028
3.00	1214	1249	1269	1272
4.00	1357	1374	1401	1409
5.00	1447	1442	1464	1486

### *Baja funcionalidad de los ciclos largos*

Por otro lado, en esta revisión se incluiría la funcionalidad de los ciclos largos, es decir mayor de 120 segundos. En la siguiente tabla 12 se muestra las simulaciones dejando el verde constante y aumentando el ciclo hasta 135 segundos.

Tabla 12: Simulaciones realizadas en el WinQSB con el modelo G/G/2 con verde constante y ciclos variables. (Tiempos de espera)

Flujos	Discreta(52/120)	Discreta(52/125)	Discreta(52/130)	Discreta(52/135)
1.00	160	106	207	197
2.00	940	983	989	1028
3.00	1242	1229	1249	1285
4.00	1389	1385	1391	1406
5.00	1461	1509	1467	1488

Se puede observar que a medida que el ciclo aumenta los retardos son mayores como se observa en la proporción 52/135.

Resultados para el modelo de las rotondas

A continuación, en la figura 32 se muestran los resultados para el modelo que relaciona las rotondas Centroamérica y Jean Paul Genie con un ciclo común:

13:14:52 Wednesday September 27 2017								
Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)	
1 x	35	1	35	0	basic	-M	1	
2 y	92	1	92	0	basic	1	M	
Objective	Function	(Max.) =	127					
Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS	
1 C1	127	<=	127	0	1	117	M	
2 C2	127	>=	117	10	0	-M	127	
3 C3	92	>=	82	10	0	-M	92	
4 C4	35	>=	35	0	0	0	45	
5 C5	35	<=	45	10	0	35	M	

Figura 32: Solución por el WinQSB del modelo óptimo para las rotondas.

De aquí se puede ver que el valor para  $x=35$  y para  $y=92$ , esto nos da un ciclo común de 130 segundos.

## X. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El método Webster es el método descrito por los diferentes autores para determinar ciclos de demoras mínimas, salvo lo planteado por Akcelik que presenta algunas objeciones al mismo y el método simultáneo.

En la teoría desarrollada se ha planteado ideas para relacionar los ciclos de los semáforos en varias intersecciones y encontrar un ciclo común en (Fernández Aguilera, 2014), así como la cercanía de los mismos según Lazo, Leonardo y Sánchez, Gilberto (1981), donde mencionan que “generalmente todos los semáforos dentro de un mismo sistema deberán tener igual longitud. Sin embargo, condiciones especiales tales como la longitud entre semáforos, las velocidades que se desarrollan entre ellos, puede hacer deseable que las longitudes del ciclo en semáforos determinados sean múltiplos o submúltiplos de la longitud.

En esta investigación se ha logrado establecer relaciones entre dos semáforos dados, pero con ciclos diferentes según el algoritmo heurístico propuesto.

Por ejemplo para el caso de los ciclos originales de 125 y 131 Galerías y el Club Terraza respectivamente, se puede observar que el mínimo es de 256, 125 veces el ciclo 2 y 131 veces el ciclo 1, ya que los ciclos son primos entre sí, es decir no tienen relación alguna en término de las coincidencias que no hay ni una sola dentro de la hora de máxima demanda (3600/16375).

Al realizar los cálculos según el modelo modificado se encontró la mejor combinación 120 y 130 segundos, para los ciclos de los semáforos, se puede

observar que el mínimo ahora es de 25, 12 veces el ciclo 2 y 13 veces el ciclo 1, al tener esta relación entre sí, las coincidencias son a lo más tres (3600/1560).

Por lo tanto la relación encontrada está respaldada, ya que sus ciclos son múltiplos entre sí, lo que se garantiza teniendo el Máximo Común Divisor de los ciclos propuestos máximo.

Cabe mencionar aquí, que cuando las coincidencias no ocurren según lo propuesto en este estudio para los parámetros originales de dos semáforos, se pueden calcular según esta propuesta empírica, que sería  $MCM(125,131)/MCD(120,130)=1638$ . Para este caso aún sigue siendo óptimo ya que es superior al 1560 de nuestra propuesta.

#### Análisis de la Simulación del óptimo

Los resultados del modelo de simulación para los ciclos originales 125 y 131 segundos (figura 30) presentan mayor saturación (77.99%) que el modelo de simulación para los ciclos óptimos 120 y 130 segundos (figura 31) (76.94%) esto se debe posiblemente a la reducción del tamaño de los ciclos que aumenta en alguna medida el porcentaje de verde efectivo en ambos semáforos.

#### Proporción de verde efectivo

Como se muestra en la figura 33, la línea azul representa los tiempos de espera para el verde de 52 segundos hasta el verde de 46 segundos (línea amarilla), se puede ver que el semáforo mejora los tiempos cuando el verde está en 50 segundos (línea café), hay una convergencia cuando los flujos aumentan. De forma empírica se puede establecer que para ciclos grandes los porcentajes de verde deber ser al menos el 40%.

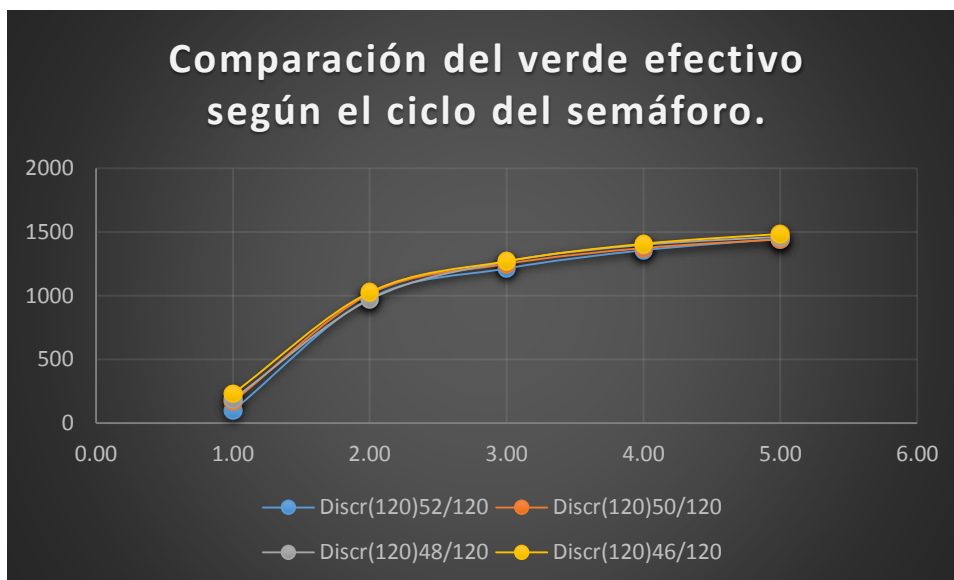


Figura 33: Comparación del verde efectivo con ciclo constante (Fuente: Tabla 5)

Los ciclos largos tienen menor funcionalidad

Se puede observar de la figura 34 que para flujos muy altos, el ciclo de 120 segundos con 52 segundos de verde para la fases respectiva (línea azul) mejora los tiempos de espera en comparación de los ciclos de 125 y 130 segundos. Los ciclos largos no son adecuados, más aun cuando los semáforos están cercanos. Los mayores retardos ocurren cuando el ciclo es máximo (52/135)

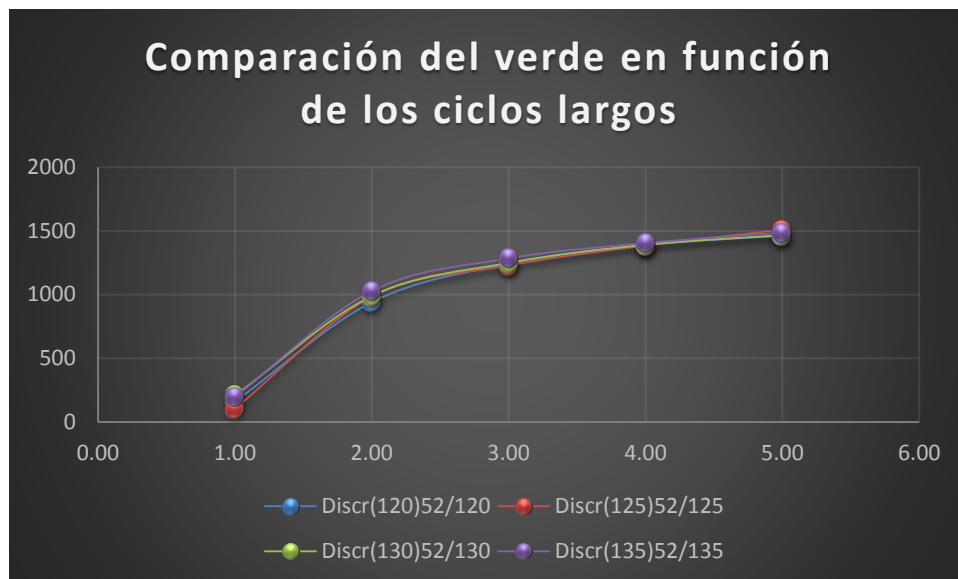


Figura 34: Comparación del verde efectivo y ciclo variable (Fuente: Tabla 6)

#### Ciclo y coincidencias para la rotonda Jean Paul Genie

En la figura 35 se puede ver la propuesta para el ciclo de la rotonda Jean Paul de 130 segundos, el cual queda directamente relacionado con los ciclos de los semáforos de Galería y Las Colinas y además con la otra rotonda como sigue:

Tabla 13: Tiempos de verde efectivo en cada fase en la rotonda Jean Paul

Relación con:	Acceso	Tiempo (segundos)			
		Verde	Amarillo	Rojo	Total
R CA	<b>Norte(N)</b>	35	3	92	<b>130</b>
S Galerías	<b>Oeste(W)</b>	35	3	82	<b>120</b>
S Las Colinas	<b>Sur(S)</b>	45	3	82	<b>130</b>
No tiene	<b>Este(E)</b>	-	-	-	





Figura 35: Relación de los ciclos según la rotonda Jean Paul Genie.

Las coincidencias son máximas con respecto a la rotonda Centroamérica y el semáforo de las Colinas ya que tiene iguales ciclos. Con respecto al semáforo de Galería es similar a la relación de ciclos obtenidos con el Club Terraza.

#### Ciclo y coincidencias para la rotonda Centroamérica

En la figura 36 se puede ver el ciclo de la rotonda Centroamérica de 130 segundos, el cual queda directamente relacionado con los ciclos de los semáforos Edificio Pellas, La Salle y Farmacia Vida y además la otra rotonda como sigue:

Tabla 14: Tiempos de verde efectivo en cada fase en la rotonda Centroamérica

Relación con:	Acceso	Tiempo (segundos)			
		Verde	Amarillo	Rojo	Total
S Edif. Pellas	<b>Norte(N)</b>	35	3	82	<b>120</b>
S La Salle	<b>Oeste(W)</b>	45	3	77	<b>125</b>
R JP	<b>Sur(S)</b>	35	3	92	<b>130</b>
Farm. Vida	<b>Este(E)</b>	25	3	62	<b>90</b>



Figura 36: Relación de los ciclos según la rotonda Jean Paul Genie.

Como se puede observar las coincidencias de la rotonda son similares a las de Galería y el Club Terraza con respecto al Edificio Pellas.

Al analizar las coincidencias con respecto a la Farmacia Vida el óptimo es de (90, 120) (Ver figura 37). El ciclo propuesto de 120 para la rotonda las mantiene relacionadas.

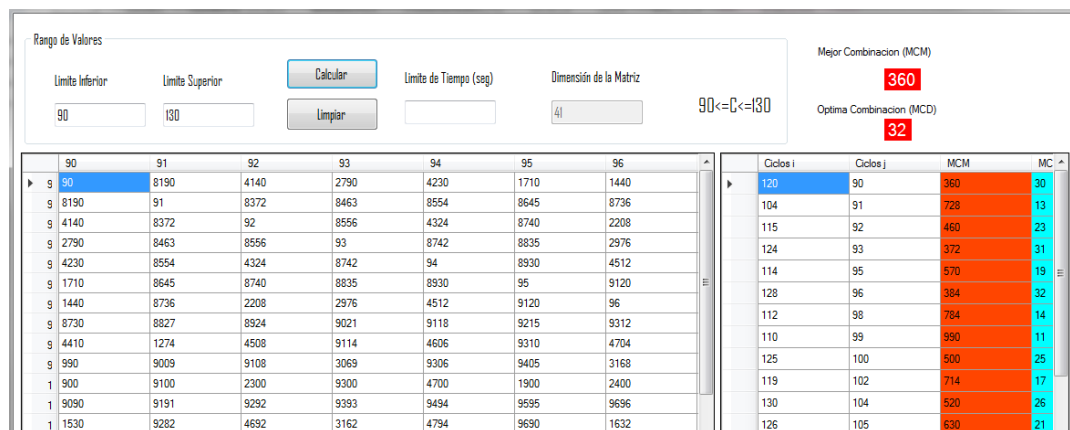


Figura 37: Óptimo para la relación entre la rotonda CA y Farmacia Vida.

Al analizar las coincidencias con respecto a La Salle el óptimo no cambia (Ver figura 38).



Figura 38: Óptimo para la relación entre la rotonda Centroamérica y La Salle

Esto plantea que el ciclo para la rotonda Centroamérica podría reducirse hasta 120 segundos manteniéndose relacionada con la otra rotonda.

## XI. CONCLUSIONES

El método Webster es un enfoque tradicional que se utiliza para lograr un control adecuado en las intersecciones donde se necesita una regulación por medio de semáforo. Este método es el que utiliza la Policía Nacional en Managua.

Los autores consultados en esta investigación establecen relaciones a través de un ciclo común o múltiplos de ellos, en ésta investigación se logró relacionar dos ciclos diferentes.

La mejor relación entre los ciclos de los semáforos Club Terraza y Galerías es de 120 y 130 segundos, pero sólo se verifica en la fase EO y OE. Esto se comprobó realizando simulaciones, donde las saturaciones fueron mayor para los ciclos originales (figura 30) que la propuesta óptima (figura 31).

La relación que mayor número de coincidencias presenta es 120 y 130 segundos para los ciclos de los semáforos Club Terraza y Galerías en la fase EO y OE.

Las coincidencias de los semáforos con los ciclos considerados sin relación en este estudio se dan como una aproximación entre MCM de los ciclos originales y el MCD de los ciclos óptimos ( $16375/10 \approx 1638$  segundos un poco mayor al MCM óptimo de 1560).

El verde efectivo por fases debe ser proporcional para los ciclos largos (mayor de 120 segundos) propuestos en la fase dada al menos en 40%.

Los ciclos cortos (menos de 120 segundos) tienen mejor desempeño que los ciclos largos, ya que los semáforos de manera general están muy cercanos y la teoría indica que se deben coordinar.

Las rotondas Centroamérica y Jean Paul Genie están relacionadas solamente en la fase NS y SN.

El ciclo común según los ciclos de los semáforos cercanos es de 130 segundos para la rotonda Jean Paul Genie por tener mayor dimensión y para la rotonda Centroamérica se puede utilizar un ciclo de 120 segundos.

La red propuesta presenta en conjunto el número máximo de coincidencias dos a dos.

La metodología propuesta para revisar dos semáforos en término de sus coincidencias y la similar para revisar las rotondas como semáforos se puede implementar para revisar cualquier tipo de red de semáforos con estas características.

## XII. RECOMENDACIONES

Realizar más pruebas con datos reales para mejorar el modelo propuesto para relacionar dos semáforos.

Establecer coordinaciones con la Policía Nacional para escuchar sus aportes y considerar revisar los tiempos peatonales.

Divulgar estos resultados para escuchar aportes y mejorar el mismo.

Rescatar el espacio peatonal que se pierde en el diseño de rotondas ya que actualmente por el crecimiento comercial en la zona son más necesarios.

Esta metodología se puede aplicar por ejemplo al Transporte Urbano Colectivo para diseñar mejor los recorridos contemplando los retardos por los semáforos y contemplar alguna prioridad en algunos accesos

### XIII. BIBLIOGRAFÍA

- Akcelik, R. (1989). Traffic Signals Capacity and Timing Analysis. (R. R. ARR, Ed.) *Australian Road Research Board*, 123.
- Akcelik, R. (2005). Capacity and Performance Analysis of Roundabout Metering Signals. *TRB National Roundabout Conference*. Vail, Colorado, USA. Recuperado el 25 de Octubre de 2017, de [www.teachamerica.com/Roundabouts/RA054A\\_ppt\\_Akcelik.pdf](http://www.teachamerica.com/Roundabouts/RA054A_ppt_Akcelik.pdf)
- Barrientos Ruiz, R., & Fernández Koprach, D. (1989). METODOLOGIA PARA LA DETERMINACION DEL TIEMPO DE CICLO. *Acta IV Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, 1989* (págs. 19-32). Chile: Universidad de Chile.
- Cal y Mayor, R., & Cárdenas, J. (2007). *Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones* (Octava ed.). México: Alfaomega.
- Diario, E. N. (2016). Nacionales. *Primeros Semaforos Inteligentes*.
- Fernández Aguilera, R. (2014). *Temas de ingeniería y gestión de tránsito*. México: RIL editores.
- Gibson, J., Saavedra, A., & J.P., S. (1982). *Metodología para la programación de redes de semáforos de tiempos prefijados*. Chile: Publicación ST-INV/01/82, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Gómez Restrepo, A. (2005). *EL ESTADO DEL ARTE EN LA MODELACIÓN DE PROBLEMAS DE TRANSITO*. Colombia: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Recuperado el 18 de 10 de 2017, de [www.bdigital.unal.edu.co/1973/1/alejandrogomezrestrepo.2005.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/1973/1/alejandrogomezrestrepo.2005.pdf)
- Lara, R. (30 de Septiembre de 2015). Semáforos inteligentes a rotonda Jean Paul Genie. *El Nuevo Diario*.
- Lara, R. (14 de Junio de 2017). Anuncian instalación de 46 nuevos semáforos inteligentes. *El Nuevo Diario*.
- Lazo Margáin, L. (1985). *Glosario de planificación vial*. México: Miguel Ángel Porrúa.



- Lazo Margáin, L., & Sánchez Ángeles, G. (1981). *Una fisonomía de la ingeniería de tránsito*. México: Miguel Ángel Porrúa.
- Martín-Gasulla, M. (27 de Marzo de 2017). La idea española para acabar (por fin) con los atascos en las rotondas. *El Confidencial*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2017, de [http://www.elconfidencial.com/tecnologia/2017-03-27/trafico-tecnologia-ingenieria-upv-rotonda-atascos\\_1356022/](http://www.elconfidencial.com/tecnologia/2017-03-27/trafico-tecnologia-ingenieria-upv-rotonda-atascos_1356022/)
- Mendoza Orozco, X. (9 de Octubre de 2013). *Mejoramiento del Servicio de Transporte Urbano Colectivo en la Pista Juan Pablo II, Managua-Nicaragua*. Obtenido de <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/18142>
- Mendoza, C. (2017). *Relacionar las medidas de rendimiento y los tiempos óptimos de los ciclos C1 y C2 de dos semáforos respectivamente para obtener un mejor funcionamiento entre ellos.(Galerías y Club Terraza)*. Juigalpa: Universitaria.
- Mendoza, C., & Marín, P. (2012). Revisión de los parámetros óptimos de funcionamiento de los semáforos de Rubenia y Villa Fontana(ENITEL),2003-2010. *SIMMAC*, 112.
- Morales, R. J., & Gonzales, J. J. (2013). *Control del trafico vehicular por medio de semaforos inteligentes*. Maracaibo.
- NCHRP-572. (2007). Roundabouts in the United States, National Cooperative Highway Research. *Transportation Research Board of the National Academies*.
- Prensa, D. I. (s.f.). *Semaforos Inteligentes*. 2016.
- Rivera, A. (8 de Julio de 2008). Rotondas:Caducas y peligrosas. *La Prensa*, pág. 8A. Recuperado el 11 de 1 de 2017, de <http://www.laprensa.com.ni/archivo/2008/julio/09/noticias/nacionales/270647.shtml>
- Silva, J. A., & Moncada, R. (7 de Agosto de 2017). Managua se asfixia en carros por falta de parqueos. *La Prensa*.
- Taha, H. A. (2012). *Investigación de Operaciones* (Novena ed.). México: Pearson Educación.

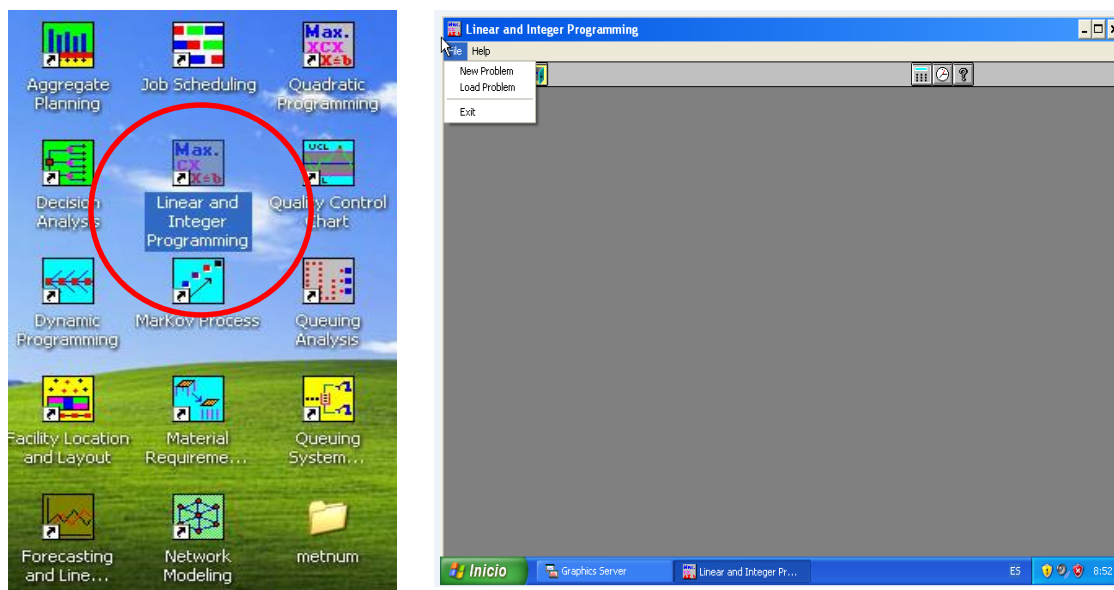


- Thomson, I., & Bull, A. (2002). La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales. *Revista de la CEPAL*(76), 13.
- Verde, E. (s.f.). *Ecología Verde*. Obtenido de Desarrollo sostenible para un mundo mejor: <http://www.ecologiaverde.com/principales-fuentes-emision/>
- W, M. C., D., L. R., & E., H. ( 2014). *Optimización en las medidas de rendimiento de las fases del semáforo en horas de máxima demanda, ubicado en el mercado Iván Montenegro en el mes julio del año 2014*. UNAN-Managua. Managua: Universitaria.
- Webster, F. (1958). Traffic Signal Settings. (H. M. Road Research, Ed.) *Road Research Technical Paper*(39).
- Wikipedia. (s.f.). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Accidente\\_de\\_tr%C3%A1nsito](https://es.wikipedia.org/wiki/Accidente_de_tr%C3%A1nsito)
- Wikipedia. (s.f.). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_inteligente](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_inteligente)

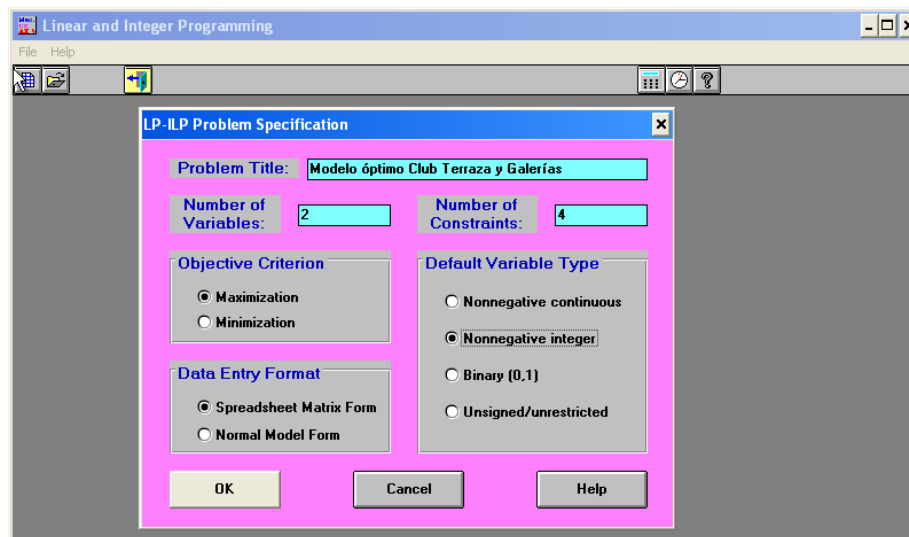
## XIV. ANEXOS

### Anexo 1: Uso del software WinQSB.

Al utilizar el programa de apoyo WinQSB aparece un menú donde se selecciona la opción *Linear and Integer Programming* como se observa a la izquierda. A la derecha aparece la ventana correspondiente a esta rutina, donde se selecciona *New Problem*.



Posteriormente aparece la ventana que demanda la información siguiente, la cual se completa con el modelo matemático de la página 78 como sigue:



Seguidamente se completa con los datos del modelo correspondiente como sigue:

Variable -->	m	n	Direction	R. H. S.
Minimize	1	1		
Desfase	130	-120	<=	89
Coincidencia	130	-120	>=	0
N de C 130	130		>=	1560
N de C 120		120	>=	1560
LowerBound	0	0		
UpperBound	M	M		
VariableType	Integer	Integer		

Resolviendo el modelo se obtiene los siguientes resultados:

Linear and Integer Programming

File Format Results Utilities Window Help

0.00

Combined Report for Modelo óptimo semáforo Terraza y Galerias

	10:34:05		Wednesday	September	13	2017		
	Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)
1	m	12,00	1,00	12,00	0	basic	0	M
2	n	13,00	1,00	13,00	0	basic	0	M
	Objective	Function	(Min.) =	25,00				
	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS
1	Desfase	0	<=	89,00	89,00	0	0	M
2	Coincidencia	0	>=	0	0	0	-M	0
3	N de C 130	1560,00	>=	1560,00	0	0,01	1560,00	1649,00
4	N de C 120	1560,00	>=	1560,00	0	0,01	1471,00	1560,00

Inicio Graphics Server Linear and Integer Pr... ES 10:34

## Anexo 2: Manual Mac 1.0.4

Rango de Valores

Límite Inferior **1**    Límite Superior **2**     **3**    Límite de Tiempo (seg) **5**    Dimensión de la Matriz **6**    **7**    Mejor Combinación (MCM) **8**

        **4**             $a \leq b <= b$      **9**

Optima Combinación (MCD) **9**

**10**    **11**

1. Casilla de rango o límite inferior: solo admite valores mayores a 0.
2. Casilla de rango superior o Límite superior: no admite valores menores al límite inferior.
3. Botón calcular: hace el cálculo de una matriz, con los valores dados en límite inferior y límite superior. Las Casillas 1 y 2 no deben estar vacías.
4. Botón limpiar: Limpia los valores en las casillas 1,2, 5 y 6, en las ventanas de matrices 10 y 11. Para calcular con otros valores pulse el botón Limpiar.
5. Casilla Límite de Tiempo (Segundos): se establece el tiempo máximo como un límite a mostrar en la columna de combinaciones MCM de la ventana de matriz 11, Tiempo dado en Segundos. Esta Casilla puede estar vacía, valor predeterminado 3600 Segundos.
6. Casilla de Dimensión de la Matriz: es un valor calculado, Limite Superior menos Límite Inferior, esta casilla no se puede editar directamente, el valor

calculado no debe ser mayor a 550 ( $LimiteSuperior - LimiteInferior \leq 550$ )

7. Muestra el segmento de las columnas y filas de la ventana de Matriz 10. Valores establecidos en límite inferior y límite superior.
8. Mejor Combinación (MCM): Muestra el valor menor de la columna (MCM) de la ventana de Matriz 11.
9. Óptima Combinación (MCD): Muestra el valor máximo de la columna (MCD) de la ventana de Matriz 11.
10. Matriz de MCM: Muestra una matriz calculada a partir de los valores límite inferior y límite superior: ( $a \leq i \leq b$ ) para las columnas; ( $a \leq j \leq b$ ) para las filas.
11. Matriz de resultados: Muestra las Combinaciones de MCM y MCD con las posiciones *Ciclos i* y *Ciclos j*.

ranqu us valeurs

Limite Inferior:  Limite Superior:    Limite de Tiempo (seg):  Dimension de la Matriz:   $45 \leq C \leq 80$

Mejor Combinacion (MCM): **138**

Optima Combinacion (MCD): **26**

	45	46	47	48	49	50	51
45	45	2070	2115	720	2205	450	765
46	2070	46	2162	1104	2254	1150	2346
47	2115	2162	47	2256	2303	2350	2397
48	720	1104	2256	48	2352	1200	816

Ciclos i	Ciclos j	MCM	MCD
50	45	180	15
55	46	130	25
45	47	2115	1
77	48	144	24

1. Filas: los valores de las filas están dadas por el límite inferior y límite superior ( $a \leq C \leq b$ ).
2. Columnas: los valores de las Columnas están dadas por el límite inferior y límite superior ( $a \leq C \leq b$ ).
3. Columnas:
  - Ciclos *i*: Contiene valores obtenido de las columnas.
  - Ciclos *j*: Contiene valores obtenidos de las filas

MCM: Contiene valores menores de cada columna de la ventana de Matriz de MCM.

MCD: Contiene valores calculados, MCD de *ciclos i* y *ciclos j*