

“DESARROLLAR UNA METODOLOGÍA PARA LA TEMPORIZACIÓN DE SEMÁFOROS EN LA CIUDAD DE IBARRA”

Enríquez Aldás David Alexander

daenriqueza@utn.edu.ec

Realpe Chamorro Edison Ricardo

errealpech@utn.edu.ec

CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	3
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
3. METODOLOGÍA	7
3.1 Medición de flujo vehicular.	7
3.2 Análisis de la geometría de la intersección.....	9
3.2.1 Señalización horizontal y vertical.	9
3.3 Formas de regulación.	11
3.4 Determinación de movimientos.	12
3.5 Temporización del semáforo.	13
3.5.1 Toma de datos dentro de la intersección en conflicto.	13
3.5.2 Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados.	14
3.5.3 Vehículos directos equivalentes.....	15
3.5.4 Tiempos de amarillo y todo rojo.	16
3.5.5 Tiempos totales perdidos.	17
3.5.6 Máximas relaciones de flujo.	17
3.5.7 Ciclo óptimo de la intersección.	18
3.5.8 Tiempo del verde efectivo total en la intersección.	18
3.5.9 Tiempos en verde para cada fase de la intersección.	19
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	19
4.1 Análisis de movimientos.	19
4.2 Análisis tiempos de ciclo.....	20
4.3 Análisis de colas.	21

4.4 Análisis de los niveles de servicio dentro de la intersección.....	23
4.5 Análisis del consumo de combustible y emisiones.	24
4.5.1 Análisis del consumo de combustible promedio en la intersección..	24
4.5.2 Análisis de las emisiones de CO ₂ promedio de la intersección.	27
5. CONCLUSIONES	28
6. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	29

RESUMEN

Uno de los factores más influyentes en el progreso y desarrollo del centro urbano de la ciudad, es el crecimiento vehicular. La aplicación de una metodología correcta para la temporización de semáforos conlleva a la disminución del volumen de tránsito urbano y mejoras económicas y sociales en la ciudad. El presente proyecto propone el desarrollo de una metodología para la temporización de semáforos en la ciudad de Ibarra, que se aplicará en las intersecciones con mayor volumen vehicular, exponiendo una alternativa de solución para problemas de congestión, consumo, emisiones de gases y economía vial, que ayudarán a mejorar la calidad de vida de la población. Los datos obtenidos se realizaron con la ayuda de la Empresa Pública de Movilidad (MEP) y por medio de conteos manuales, estos se efectuaron por personal con excelente observación y percepción para determinar los diferentes tipos de movimientos existentes dentro de la intersección. Para un mejor entendimiento a continuación se presentan tablas, ejemplos y figuras dinámicas capaces de apreciar el comportamiento del flujo, volumen, consumo y emisiones de gases que se generan en las intersecciones semaforizadas. El resultado obtenido con la propuesta es completamente satisfactorio debido que se aumentó el flujo vehicular y con ello se disminuyeron demoras, además se minimizó el volumen dentro de la intersección subiendo de nivel al tipo E y lo más importante se pudo reducir un estimado en el consumo de combustible anual en 23.681\$, el cual es un ahorro significativo en el gasto de combustible para el GAD-Ibarra y el gobierno nacional.

ABSTRACT

One of the most influential aspects in the progress and urban development in the city is the vehicular increase. The application of a better methodology to upgrade the traffic lights timing to a decrease in urban traffic and economic progresses in the city. This project suggests the development of a methodology for the traffic lights timing in the Ibarra city, these traffic lights will be at the intersections with the most traffic, this could provide a solution for traffic problems and road economy. The information obtained was with the help of the public company MEP and by manual counts. For your understanding, tables, examples and dynamic figures are presented. It shows the behavior of the flow, volume and vehicular traffic at intersected traffic signals. The result obtained is satisfactory because it improved the traffic flow and with this slows delays in addition the traffic inside the intersection was minimized going up of level to the type E and most importantly thing, the annual fuel consumption could be reduced by 23.681\$ which it is a saving for the car gasoline for the GAD-Ibarra and the national government.

1. INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo tiene como objetivo principal el desarrollo de una metodología para la temporización de semáforos en la ciudad de Ibarra para la optimización de tiempo de viaje, así como también la adquisición de datos a través de su desarrollo para su posterior análisis, logrando de esta manera obtener información acerca de la temporización de semáforos que permitan mejorar los problemas relacionados a la congestión vehicular y al consumo de combustible.

En la actualidad el GAD Ibarra no cuenta con un sistema que proporcione información sobre la temporización de semáforos dentro y fuera de la ciudad, lo que limita el desarrollo de proyectos de investigación que soluciones los problemas de congestión vehicular y consumo de combustible generados principalmente en las horas pico dentro de la ciudad.

La metodología se desarrolla en la Universidad Técnica del Norte, tomando como área de estudio a la ciudad de Ibarra, de la cual se obtienen los datos proporcionados por la empresa pública de movilidad (MEP) y del área de semaforización de la misma, de los cuales se realiza los respectivos conteos y análisis que ayudarán al desarrollo de la investigación.

En la presente investigación se utilizan la mayor cantidad de conceptos relacionados con la temática de estudio, es así que se muestra las diferentes metodologías e investigaciones realizadas en otros países, que servirán como guía para el desarrollo y posterior implementación de la temporización de semáforos en la ciudad de Ibarra y en cualquier GAD del Ecuador. De igual manera se adjunta toda la información referente al consumo de combustible, la planificación del transporte y la gestión de tráfico, además se añade información concerniente a la jerarquización vial que es muy importante para el desarrollo de la investigación, tomando en cuenta las variables que posee el tráfico, los métodos de conteo eficiente a la hora de la recolección de datos, el diseño de las intersecciones, la capacidad vial dentro de una ciudad y la longitud de colas en una vía.

La propuesta se implementará en base a la metodología que mejor se acoge a la situación real de la ciudad de Ibarra, la cual es la de Rafael Cal y Mayor R. implementada en México, la misma que la divide en 7 pasos que facilitarán el estudio, en donde se realiza mediciones del flujo vehicular mediante conteos manuales, análisis de la geometría de la vía con sus respectivas formas de regulación, determinación de todos los movimientos posible que tiene la intersección a estudiar, y posteriormente realizar la temporización de los semáforos a través de fórmulas que son fáciles de aplicar, para diagnosticar los niveles de servicios presentes en la intersección y el consumo de combustible que se genera en la misma.

Se presentan las pruebas de los análisis con la implementación de la metodología propuesta, haciendo una comparación de los datos actuales que tiene la ciudad de Ibarra con relación a los datos obtenidos con la metodología. Además todos los datos son ilustrados mediante tablas y gráficas que facilitar su interpretación, llegando a determinar que la investigación realizada es

totalmente factible y viable, acogiendo a toda intersección con alto flujo vehicular de cualquier ciudad. Así mismo se muestra el ahorro del consumo de combustible en ralentí que generan los vehículos dentro de la intersección semaforizada, reduciendo el costo monetario notablemente en beneficio del GAD Ibarra y de todo el Ecuador.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

Actualmente Ibarra posee alrededor de 142 intersecciones semaforizadas de las cuales 102 utilizan tecnología led y cámaras, que ayudan al monitoreo del flujo vehicular desde la central de control ubicada atrás del colegio Nacional Ibarra, debido que el incremento del parque automotor oscila del 8 al 11% anual, ocasionando demoras en la circulación y malestares en los peatones por la contaminación tanto ambiental y acústica.

Debido a esta problemática que acosa a nuestra ciudad es recomendable optar por medidas alternas que ayuden a controlar el conflicto vehicular, por medio de metodologías y análisis que nos permitan reducir los tiempos de espera, las emisiones de gases, producidas en las intersecciones de gran flujo vehicular.

El enfoque se ha plasmado en la optimización de las intersecciones y en el reajuste del diseño de ejes viales, para modificar crecientes demandas del tráfico, apreciando que la disminución de la congestión vehicular traerá consigo la reducción de los impactos negativos innatos al tráfico. Si bien este supuesto puede ser válido en algunos casos, obstaculiza las herramientas que posee la ingeniería para afrontar otros problemas urbanos y ambientales.

Existen diversas causas por las cuales se produce la congestión vehicular como son: desarrollo urbano inorgánico, características físicas y topológicas de la red, políticas de transporte inadecuadas, aumento de la tasa de motorización y gestión de tránsito deficiente, estas acciones deben estudiarse y analizarse por separada muy profundamente, debido a las costosas soluciones de infraestructura vial que se debe aplicar a cada acción.

Los objetivos generales de planificación de transporte urbano citados anteriormente deben estar sometidos a la gestión de tránsito que se realice en cada zona determinada. A continuación se mencionarán los siguientes objetivos específicos de gestión de tránsito:

- Optimizar el funcionamiento de la infraestructura vial existente (vías, intersecciones, terminales).
- Asegurar una adecuada accesibilidad a las actividades urbanas por parte de todos los grupos de ciudadanos (peatones, pasajeros, automovilistas).
- Proveer un buen nivel de servicio a todos los que realizan un uso eficiente del espacio vial urbano (transporte público, bicicletas, peatones).
- Proteger el medio ambiente y a todos sus habitantes de los efectos negativos generados por el tráfico (accidentes, ruido, polución, segregación, impactos estéticos) (AGUILERA, 2014).

Existen dos métodos viables para la obtención de conteos vehiculares: método manual y método automático.

La aplicación del método manual se recomienda cuando es necesario almacenar y registrar datos relacionados a la clasificación de los vehículos. Mientras que la aplicación del método automático se recomienda cuando se registra un patrón horario, diario o de periodos largos. La selección del método de medición más adecuado se debe determinar en función de las recomendaciones citadas anteriormente.

El registro en este conteo se lo puede realizar de tres formas: a través de formularios, de tableros mecánicos o de tableros electrónicos. Siendo los formularios el medio más simple de medición y recolección de datos, la información es tabulada mediante marcas en formularios diseñados para la zona de estudio, con la ayuda de un reloj o cronometro para medir el intervalo de tiempo ansiado.

3. METODOLOGÍA.

Para complementar esta investigación se propone aplicar la metodología de Rafael Cal y Mayor R. sobre los fundamentos y aplicaciones de la ingeniería de tránsito, a través de la toma y recolección de datos brindados por la Empresa Pública de Movilidad (MEP), la metodología consta de siete etapas, en las cuales se indican los pasos que se deben seguir para la temporización de semáforos en cualquier intersección de Ibarra, para disminuir el tiempo de espera, las colas y los niveles de servicio.

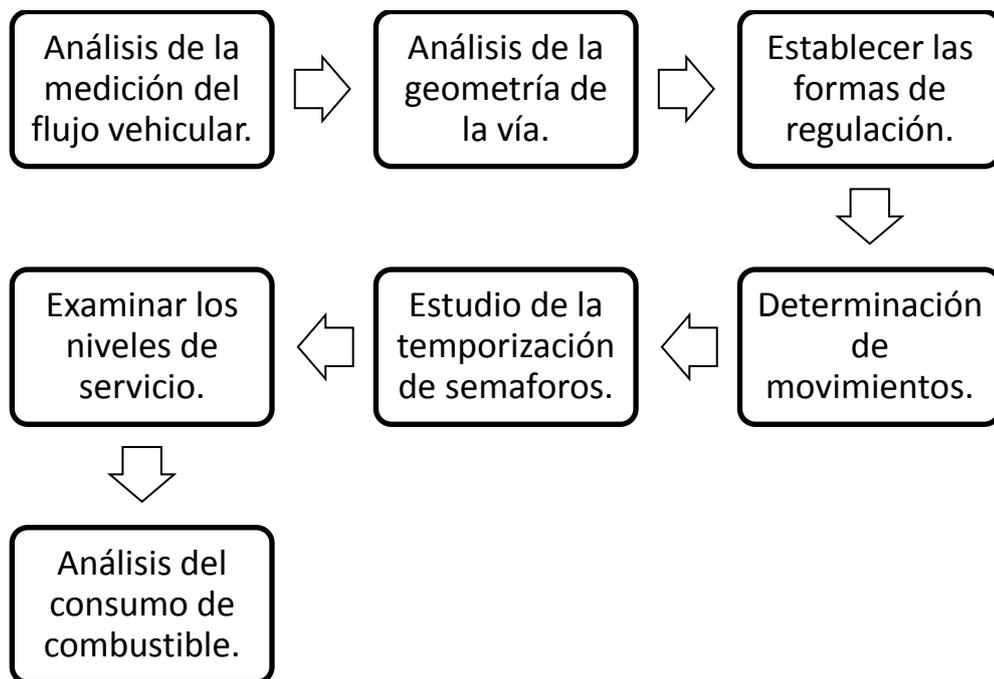


Figura 3-1: Diagrama de bloques.

3.1 Medición de flujo vehicular.

Para el desarrollo de la presente metodología, se opta por seleccionar la intersección de la avenida Mariano Acosta y la avenida Jaime Rivadeneira, ubicada en el centro de la ciudad, por poseer un ciclo de 4 fases con giros permitidos hacia la derecha y giros protegidos hacia la izquierda con su respectiva fase, además de ser una de las intersecciones con mayor flujo vehicular durante los diferentes periodos del día.

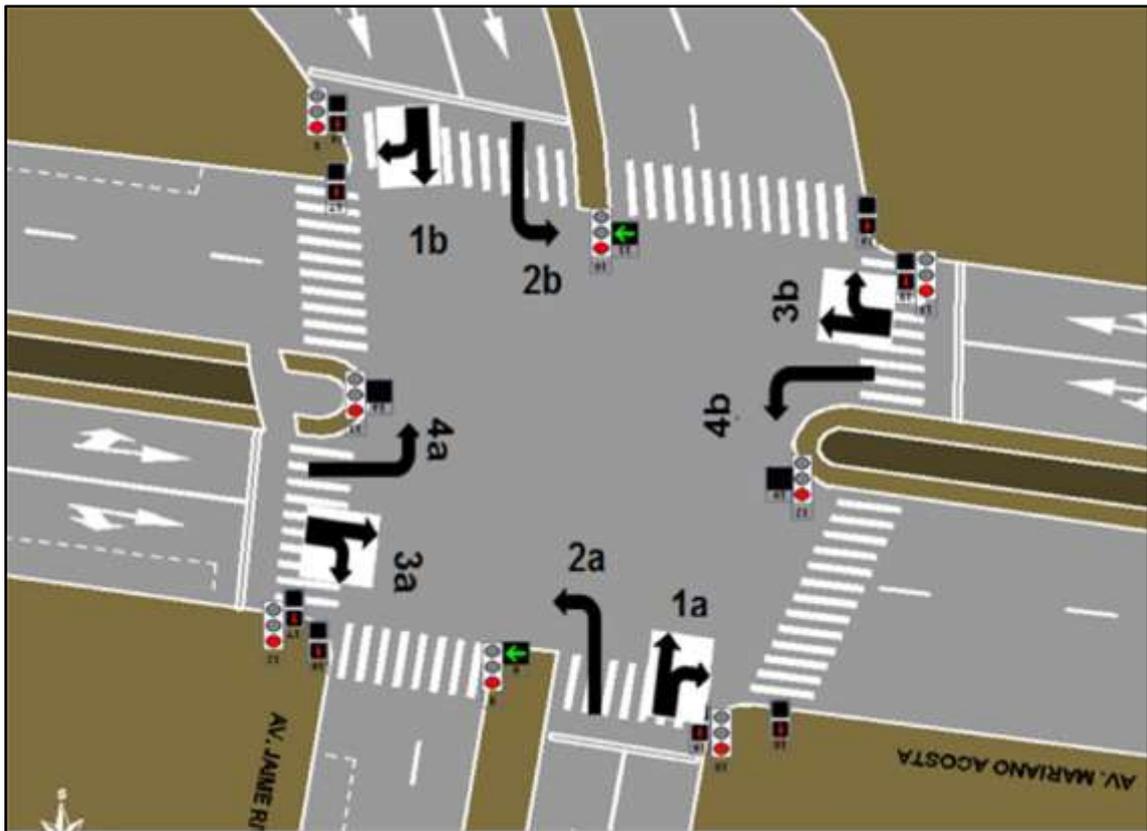


Figura 3-2: Intersección Av. Jaime Rivadeneira y Av. Mariano Acosta.
Fuente: (MEP, 2016).

En esta intersección existe una gran demanda de congestión vehicular, debido a que alrededor de ella se sitúan centros comerciales como el AKI y Laguna Mall, instituciones bancarias importantes como el Banco de Pichincha, del Austro y VisionFund, además de cooperativas de gran prestigio dentro de la localidad como: Imbaburaparc y Pilahuin Tío. En la avenida Jaime Rivadeneira se encuentran varios locales de venta de repuestos automotrices y de plomería, donde la circulación peatonal y vehicular siempre es elevado.

La toma de los conteos se la realiza entre semana, ya que según la MEP en estos días existe un mayor volumen de vehículos dentro de la ciudad, en un periodo comprendido entre las 07:00 am y las 08:00 am, estos conteos se realizaran manualmente clasificándolos en: vehículos pequeños, recreativos (Suv), buses y camiones en sus respectivos sentidos de circulación.

Para la recolección de datos se definen 4 puntos específicos de conteo, como se indica en la tabla 3-1, ubicando en cada esquina de la intersección a un compañero encargado de observar y apuntar los movimientos que realizan

los vehículos como son: giro a la derecha, giro a la izquierda y los vehículos que circulan derecho (sin giro).

Tabla 3-1: Programación de conteos vehiculares.

INTERSECCIÓN MARIANO ACOSTA Y JAIME RIVADENEIRA	Hora de conteo los diferentes días (07:00 a 08:00)								
	Fase	1a	1b	2 ^a	2b	3 ^a	3b	4a	4b
Sentido	Norte-Sur	Sur-Norte	Norte-Este	Sur-Oeste	Este-Oeste	Oeste-Este	Este-Sur	Oeste-Norte	
Sin Giro	345	211			194	360			
Giro Der	63	5			76	222			
Giro Izq.			76	104			74	145	

3.2 Geometría de la intersección.

La intersección a estudiar se encuentra dentro del área urbana de la ciudad de Ibarra en donde:

- Avenida Mariano Acosta: Vía principal, de doble sentido de circulación, con dos calzadas de 8.90m y 10,68m, separadas por un parterre central de 4.06m, además cada calzada cuenta con 2 carriles de circulación que determinan los tres tipos de movimientos mencionados anteriormente.
- Avenida Jaime Rivadeneira: de doble sentido de circulación, cuenta con 2 calzadas de 11.48m y 11.44m, separadas por un parterre de 1m, de igual manera consta de 2 carriles de circulación en cada una de sus calzadas para los movimientos mencionados.

3.2.1 Señalización horizontal y vertical.

Estas dos avenidas cuentan con una buena señalización vertical, mientras que la horizontal no es tan buena por su falta de visibilidad, debido al uso diario a las que están sometidas, como es el caso de la avenida Mariano Acosta por el gran volumen vehicular. Estas señales fueron colocadas por GAD-Ibarra, siguiendo las normas establecidas por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), esto permite que el estudio sea factible y viable en esta intersección, facilitando la toma de datos y su interpretación.



Figura 3-3: Señalización horizontal de la intersección.

Fuente: Satélite Google Maps.

Estas avenidas cuentan con una señalización horizontal, empezando con líneas continuas en la calzada, las cuales tienen una longitud de 3m, un ancho de 15cm y se encuentran separadas a una distancia de 4,5m cada una, además el cruce peatonal (paso cebra) tiene las siguientes medidas: una longitud de 4m, un ancho de 40cm y una separación de 60cm.

Entre las señales verticales se encuentran los semáforos que se ubican en los parterres y aceras de las avenidas, los cuales fueron instalados con las respectivas normas INEN por parte del municipio, permitiendo al conductor y peatón observar claramente las 3 fases que posee cada semáforo en la intersección.



Figura 3-4: Señales verticales de la intersección.

Fuente: Satélite Google Maps.

Estos semáforos cumplen con las siguientes medidas para su instalación y funcionamiento: los báculos de tres secciones, que están instalados dentro de la intersección analizada, tienen una altura máxima de 6m para visibilidad de conductores en una vía de dos carriles, mientras que en el de dos secciones la altura máxima es de 4m y la altura para en semáforo peatonal es de 2.40m, estos están colocados a 80cm del borde de la acera.

3.3 Formas de regulación.

Las formas de regulación de estas dos avenidas situadas en el centro de la ciudad, están bien diseñadas, por que cumple con los cinco objetivos de canalización de intersección establecidas por los Temas de Ingeniería y Gestión de Transito de (AGUILERA, 2014), mencionados anteriormente en el capítulo II, por lo que:

- Las maniobras en esta intersección son bien interpretadas por los conductores, debido a la demarcación existente en la calzada y sus señales horizontales y verticales, anticipan al conductor los virajes respectivos que se puede realizar en la misma.
- Las dos avenidas cuentan con áreas de espera tanto para peatones (parterre) como para vehículos (soleras), que permiten al conductor acceder a un carril de uso exclusivo de viraje a la izquierda.
- La visibilidad al aproximarse a la intersección y una vez dentro de la misma, es totalmente clara y fácil de apreciar, debido a la altura que tienen los báculos de los semáforos y su ubicación correcta al momento de su instalación.
- Esta intersección cuenta con avenidas parcialmente perpendiculares una con respecto a la otra, facilitando los cruces peatonales y las maniobras de giro en la calzada, además la gran parte de vehículos no excede el límite de velocidad de llegada a la intersección de 40Km/h, establecida por la agencia nacional de tránsito.

- El único movimiento a impedir en estas avenidas, es la implementación, de una señal de giro prohibido en U, a través de una señalización vertical de orden instalada en cada parterre.

3.4 Determinación de movimientos.

Los movimientos en esta intersección están determinados por las fases y tiempos que poseen los semáforos, cada avenida cuenta con su respectiva fase (verde, amarillo y rojo), además las dos avenidas tienen una fase para los giros protegidos a la izquierda, haciendo que esta intersección sea de 4 fases para completar un ciclo de 110 segundos.

Tabla 3-2: Ciclo de 110 segundos de la intersección.

FASE	AVENIDA	TIEMPO EN SEGUNDOS	100%	AMARRILO + TODO ROJO (seg)
1	Jaime Rivadeneira	23s	28	6s
2	Giro a la izq. Jaime Rivadeneira	17s	21	6s
3	Av. Mariano Acosta	29s	30	6s
4	Giro a la izq. Mariano Acosta	17s	21	6s

Fuente: (MEP, 2016).

A continuación se representa el reparto de fases para el ciclo actual de 110 seg, en la intersección de las avenidas Mariano Acosta y Jaime Rivadeneira, con sus respectivos sentidos, fases de tiempos y tiempos perdidos (ámbar más todo rojo), se toma en cuenta que el sentido de giro de las fases es horario.

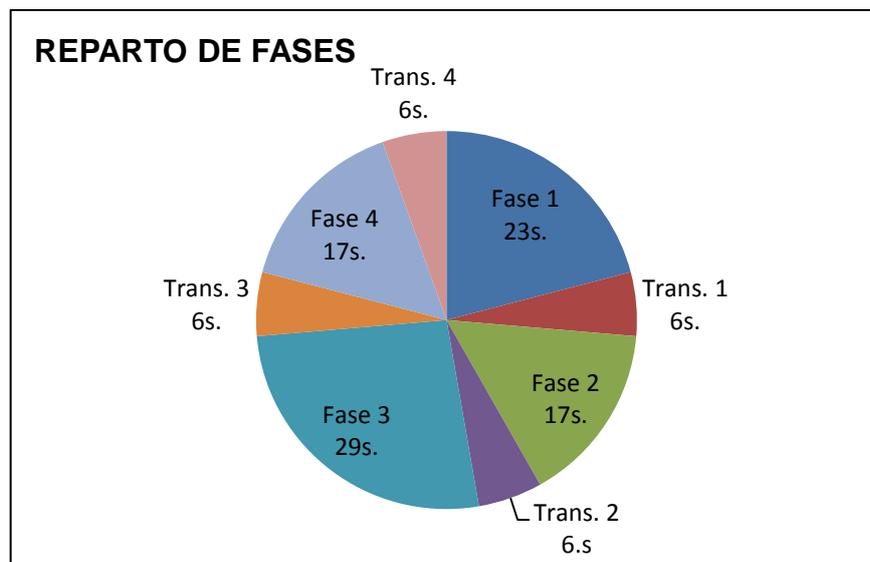


Figura 3-5: Reparto de fases en un ciclo de 110 seg.

En la siguiente grafica se representa los movimientos que se generan dentro de la intersección de acuerdo a cada una de las respectivas fases, estas fases se dividen en dos sentidos diferentes denominados tipo a y b los cuales tienen el mismo tiempo de verde efectivo en la misma dirección pero sentido contrario.

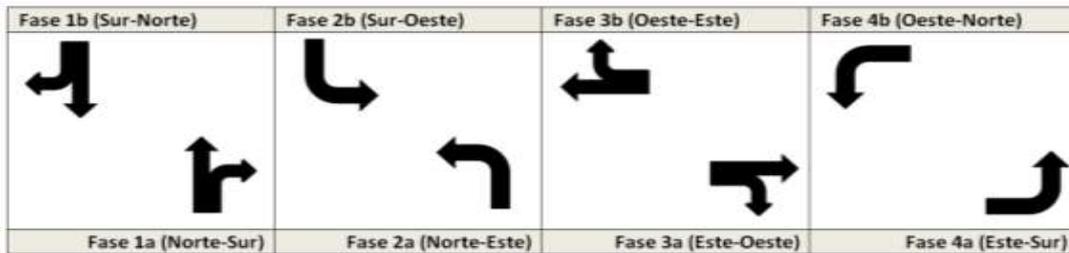


Figura 3-6: Determinación de movimientos en sus respectivas fases.

Para la temporización de un ciclo de dos fases, cabe recalcar que los movimientos en una intersección están determinados por los tiempos que poseen los semáforos, cada calzada cuenta con su respectiva fase (verde, amarillo y rojo), además estas tienen un solo sentido de dirección, por lo que no es necesario las fases para el tiempo de giro protegido a la izquierda.

3.5 Temporización del semáforo.

Para el presente proyecto se plantea desarrollar 9 pasos que determinan los tiempos reales que posee cada semáforo dentro de la intersección, de esta manera poder determinar si la metodología es viable para identificar el ciclo y así descongestionar la gran cantidad de vehículos que circulan en los 4 sentidos.

3.5.1 Toma de datos dentro de la intersección en conflicto.

Identificar la intersección con mayor conflicto de volumen vehicular y toma de datos en la hora de máxima demanda utilizando la tabla para cada uno de los sentidos. Dependiendo del número de sentidos que esta posea, ya sea de 4 fases con giro protegido a la izquierda y giro permitido a la derecha o de 2 fases con movimientos simultaneo en un solo sentido.

Se la toma de conteos se realiza únicamente en las horas de gran flujo vehicular de 06:00 a 20:00, debido a que las demás horas no existe gran número de vehículos y en las horas de la madrugada los semáforos permanecen en luz intermitente, cada fase debe tener la mayor cantidad de movimientos simultáneos para lograr un volumen óptimo en la intersección.

Tabla 3-3: Toma de datos para los diferentes sentidos.

Carriles	Derecho						Central						Izquierdo		
	Bus o Camión.		Vehículo Recrea.		Vehículo Pequeño		Bus o Camión.		Vehículo Recrea.		Vehículo Pequeño		B. C.	V. R.	V. P.
Tipos de autos															
Giros	GD	SG	GD	SG	GD	SG	GD	SG	GD	SG	GD	SG	Giro Izq.		
Total %															
Total Carril															
TOTAL															

Dónde:

GD: vehículos que giran hacia la derecha

SG: vehículos que transitan sin giro (movimiento directo)

GI: vehículos que giran hacia la izquierda.

3.5.2 Factor de ajuste por presencia de vehículos pesados.

En este paso todos los vehículos que salen de una intersección seguirían de frente, se tiene tasas máximas de flujo con intervalos casi iguales, pero no siempre sucede estos casos por lo que existen vehículos grandes y también los vehículos giran a la derecha y a la izquierda. Para estos aspectos se debe tener en cuenta los factores de equivalencia por presencia de vehículos pesados.

Los vehículos de mayor tamaño como: los camiones equivalen 3,5 automóviles, seguido por los buses que equivalen a 2 automóviles, y por último los vehículos recreativos que equivalen a 1,5. Estos a su vez por su tamaño y peso necesitan mayor tiempo de despeje en la intersección.

Para calcular el factor de efecto (F_{HV}) por presencia de autobuses y automóviles recreativos, se utiliza la siguiente ecuación, para la misma se toma en cuenta que en las intersecciones urbanas del centro de la ciudad la presencia de vehículos pesados (camiones) no se toma en cuenta debido a las normas de restricción.

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_T(E_T - 1) + P_B(E_B - 1) + P_R(E_R - 1)}$$

Dónde:

F_{HB} = Factor de ajuste por vehículos pesados.

P_T = % de camiones en corriente vehicular.

E_T = Autos que equivalen a camiones.

P_B = % de autobuses en corriente.

E_B = Autos que equivalen a un autobús.

P_R = % de vehículos recreativos en corriente vehicular.

E_R = Automóviles que equivalen a un vehículo recreativo.

3.5.3 Vehículos directos equivalentes.

Calcular los diferentes flujos de vehículos directos equivalentes (q_{ADE}) e identificar el carril de mayor volumen, para los diferentes accesos de la intersección utilizando la tabla para cada uno de los accesos. Se recomienda que, para el estudio del proyecto o diseño de tiempos de semáforos el valor de FHMD = 0.95.

Los vehículos que giran hacia la izquierda de igual manera tienen un factor de ajuste por motivo de giro, en el cual se pierde un porcentaje de tiempo llamado E_{VI} , además el factor de hora de máxima demanda (FHMD), en casos de proyectos y planes de tiempo del semáforo, se sugiere utilizar un valor de 0,95. Por su parte los vehículos que giran hacia derecha de igual manera tienen un factor de ajuste por motivo de giro, donde se pierde un porcentaje de tiempo llamado EVD.

Tabla 3-4: Vehículos equivalentes para cada sentidos

Vuela a la izquierda	Carril central	Carril derecho	Vuelta a la derecha
$q_{VI} = \frac{VHMD_{VI}}{FHMD} \left(\frac{1}{f_{HV}} \right) (E_{VI})$	$q_{AD} = \frac{VHMD_C}{FHMD} \left(\frac{1}{f_{HV}} \right)$	$q_{AD} = \frac{VHMD_D}{FHMD} \left(\frac{1}{f_{HV}} \right)$	$q_{VD} = \frac{VHMD_{VD}}{FHMD} \left(\frac{1}{f_{HV}} \right) (E_{VD})$

Dónde:

q_{AD} = Movimientos por carril central.

VHMD = Volúmenes de máxima demanda de vehículos sin giro.

FHMD = Factor de hora de máxima demanda.

f_{HB} = Factor de ajuste por vehículos pesados.

q_{VI} = Vehículos equivalentes que giran hacia la izquierda.

VHMD_{VI} = Volúmenes de máxima demanda que giran a la izquierda.

q_{VD} = Vehículos equivalentes que giran hacia la derecha.

VHMD_{VD} = Volúmenes de máxima demanda que giran hacia la derecha.

3.5.4 Tiempos de amarillo y todo rojo.

La función o el trabajo del intervalo de fase es la de alertar al conductor sobre el derecho de uso de la intersección, la cual nos indica el tiempo en el que el conductor debe prevenir el uso de desaceleración del vehículo y el de despegue de la intersección puesto que los tiempos que nos entrega esta función es amarillo mas todo rojo.

Calcular la longitud de los intervalos de cambio de fase (y). Se recomienda que el valor de la velocidad sea el indicado por las normas INEN dentro de la ciudad.

$$y = \left(t + \frac{v}{2a} \right) + \left(\frac{w + L}{v} \right)$$

Dónde:

y = Intervalo de cambio de fase, amarillo mas todo rojo.

t = Tiempo de percepción y reacción del conductor por lo general se usa 1 seg.

v = Velocidad de aproximación de los vehículos (m/s).

a = Tasa de desaceleración por lo general se usa $3,05 \text{ m/s}^2$.

W = Ancho de la intersección en metros.

L = Longitud del vehículo (6,10 m).

3.5.5 Tiempos totales perdidos.

Cuando el semáforo cambia a verde, el paso de los vehículos que cruza la línea de Pare se incrementa rápidamente a una tasa llamada flujo de saturación (s), esta tasa de vehículos que cruza la línea al arrancar es menor durante los primeros segundos, mientras los vehículos aceleran hasta alcanzar una velocidad de marcha normal.

Calcular el tiempo total perdido por el ciclo (L) dentro de la intersección, los cuales previenen al conductor.

$$L = \sum_{i=1}^{\phi} (A_i + TR_i)$$

Dónde:

L = Tiempo perdido.

A₁ = Es el Ámbar o amarillo.

TR₁ = Es el todo rojo.

Los cuales se calculan en el intervalo de cambio de fase.

3.5.6 Máximas relaciones de flujo.

Este cálculo se realiza para verificar cuanto tiempo tendrá el semáforo y este permanezca en verde, para lo cual, el cálculo se lo realizará a los carriles de mayor flujo vehicular sin importar el sentido, donde $s = 1900$ (dato tomado de las normas INEN), que equivale a los vehículos ligeros por hora de luz verde por carril.

$$Y_1 = \frac{q_{1\max}}{s}$$

Dónde:

Y_1 = Relación de flujo para cada uno de los sentidos de la fase.

q_{1max} = flujo crítico o máximo por carril de la fase.

S = flujo de saturación.

3.5.7 Ciclo óptimo de la intersección.

Calcular la longitud del ciclo a utilizar dentro de la intersección.

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

Dónde:

C_0 = tiempo óptimo de ciclo en segundos.

L = tiempo total perdido del ciclo en segundos.

Y_i = es el valor máximo en la relación entre el flujo actual y de saturación para el acceso crítico de carril i .

ϕ = número total de fases.

3.5.8 Tiempo del verde efectivo total en la intersección.

Este tiempo verde efectivo total g_T , disponible por ciclo para todos los accesos de la intersección, indica el tiempo verde efectivo total de las fases dentro de la intersección. (g_T).

$$g_T = C - L = C - \left[\sum_{i=1}^{\phi} (A_i + TR_i) \right]$$

Dónde:

g_T = Tiempo verde efectivo por ciclo disponible para todos los accesos.

C = longitud total del ciclo redondeado a los 5 segundos más cercanos.

L = Tiempo perdido.

3.5.9 Tiempos en verde para cada fase de la intersección.

Para obtener una demora total mínima en la intersección, el tiempo verde efectivo total g_T debe distribuirse entre las diferentes fases en proporción a sus valores de Y , siendo este el valor máximo de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación para acceso o movimiento o carril crítico de cada fase.

Para finalizar se calculan los tiempos verdes efectivos, en cada uno de los sentidos de la intersección en segundos, utilizando la tabla.

Tabla 3-5: Tiempos en verde para cada fase de la intersección.

Este-Oeste	Noroeste	Norte-Sur	Sureste
$g_1 = \frac{Y_1}{\sum_{i=1}^4 Y_i} (g_T)$	$g_2 = \frac{Y_2}{\sum_{i=1}^4 Y_i} (g_T)$	$g_3 = \frac{Y_3}{\sum_{i=1}^4 Y_i} (g_T)$	$g_4 = \frac{Y_4}{\sum_{i=1}^4 Y_i} (g_T)$

Dónde:

g = Tiempo en verde efectivo para cada una de las fases.

Y = Relación de flujo para cada uno de los sentidos de la fase.

g_T = tiempo de verde efectivo total.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de movimientos.

Los movimientos de esta intersección serán los mismos mencionados anteriormente, denominando a cada fase con una letra respectiva para identificar los sentidos de circulación que posee la intersección. La Av. Jaime Rivadeneira en sentido Norte-Sur y Sur-Norte tendrá una fase denominada 1a y 1b, los giros a la izquierda Norte-Este y Sur-Oeste serán 2a y 2b, por su parte la Av. Mariano Acosta en sentido Este-Oeste y Oeste-Este se representara por la fase 3a y 3b, mientras que los giros a la izquierda Este-Sur y Oeste-Norte serán 4a y 4b.

En la siguiente figura se puede identificar con mayor facilidad las fases que tiene la intersección para la realización de los diferentes análisis que ayudan al desarrollo de la metodología.

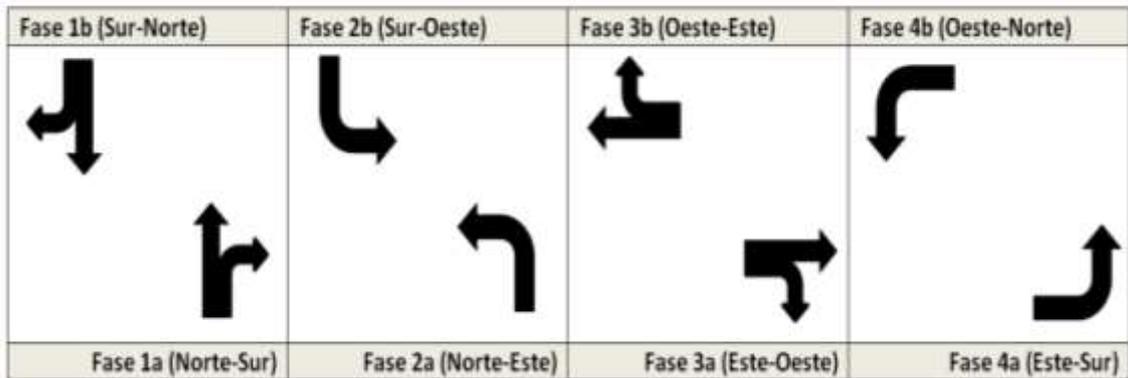


Figura 4-1: Tipos de movimientos dentro de la intersección.

4.2 Análisis tiempos de ciclo.

En la tabla 4-1 se establece una comparación de los tiempos de ciclo con sus respectivas fases, entre la información brindada por la MEP en condiciones actuales y la propuesta desarrollada con la aplicación de la metodología.

Tabla 4-1: Comparación de Ciclo Actual y Propuesto.

Avenida	Fase	Sentido	Tiempo actual en un ciclo de 110 seg.	Tiempo propuesto en un ciclo de 90 seg.	Tiempos de todo rojo más ámbar (amarillo) en seg
Jaime Rivadeneira.	1a	Norte-Sur	23.	18.	3s. Amarillo. 3s. Rojo.
	1b	Sur-Norte			
Giro izquierda Jaime Rivadeneira.	2a	Norte-Este	17.	9.	3s. Amarillo. 3s. Rojo.
	2b	Sur-Oeste			
Mariano Acosta.	3a	Este-Oeste	29.	27.	3s. Amarillo. 3s. Rojo.
	3b	Oeste-Este			
Giro izquierda Mariano Acosta.	4a	Este-Sur	17.	12.	3s. Amarillo. 3s. Rojo.
	4b	Oeste-Norte			

Según la investigación se puede determinar que para esta intersección es viable un ciclo de 90 segundos, más no el ciclo actual de 110 segundos establecido por la MEP (instalación ingenieros españoles SICE). El ciclo propuesto genera un flujo vehicular sin congestión en horas pico y disminuye la

demora dentro de la misma, además se puede apreciar que en una hora con la metodología propuesta se obtienen 7 ciclos de diferencia a partir de los 40 obtenidos con la metodología propuesta y 33 con la actual, razón por la cual el tiempo de espera de los ocupantes de la vía disminuye.

En la siguiente gráfica se indica el número de vehículos que circulan en la intersección antes y después de la aplicación de la metodología, clasificándolos en sus diferentes sentidos por medio de los conteos manuales realizados anteriormente.

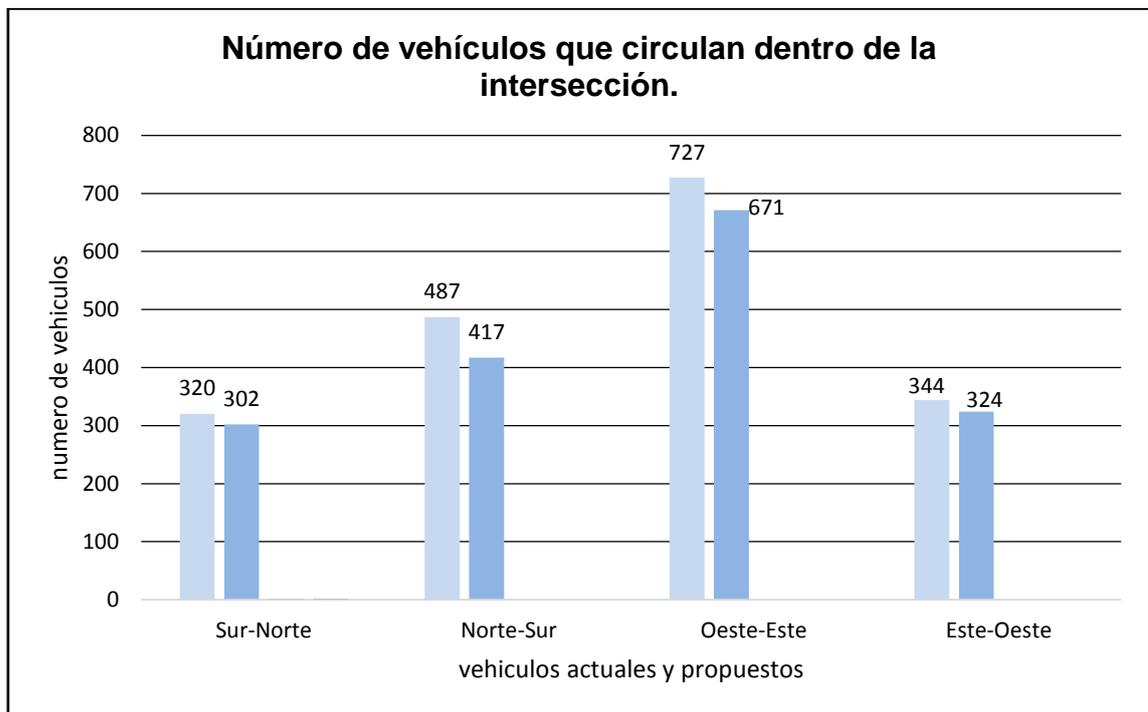


Figura 4-2: Número de vehículos dentro de la intersección.

4.3 Análisis de colas.

Los siguientes valores se obtuvieron aplicando una teoría de colas por distancia, ubicando cada 10 metros un punto de referencia a lo largo de la avenidas Mariano Acosta y Jaime Rivadeneira, los cuales permitieron determinar la cola promedio de la intersección que generan los vehículos en cada carril en el ciclo de 110 y 90 segundos.

Tabla 4-2: Cola promedio de la intersección con el ciclo de 110 y 90 segundos.

Sentidos	Cola ciclo actual 110 seg (veh/ciclo).	Cola ciclo propuesto 90 seg (veh/ciclo).	Separación entre vehículos (m)
Norte-Sur	14	11	0,6
Sur-Norte	11	10	
Este-Oeste	16	13	
Oeste-Este	18	15	
Promedio Total	15	12	

En la siguiente gráfica se puede apreciar la reducción de la cola promedio de la intersección, a través de la aplicación de la metodología propuesta con respecto a la cola actual, donde se demuestra que con el ciclo de 90 segundos se reduce en un 20% la cola en la intersección, tomando en cuenta que el largo de un vehículo promedio es de 6,10m con una separación entre vehículos de 0,6m datos obtenidos de Cal Mayor, se disminuye de la misma manera el volumen vehicular dentro de la intersección, sin afectar el desempeño de la misma.

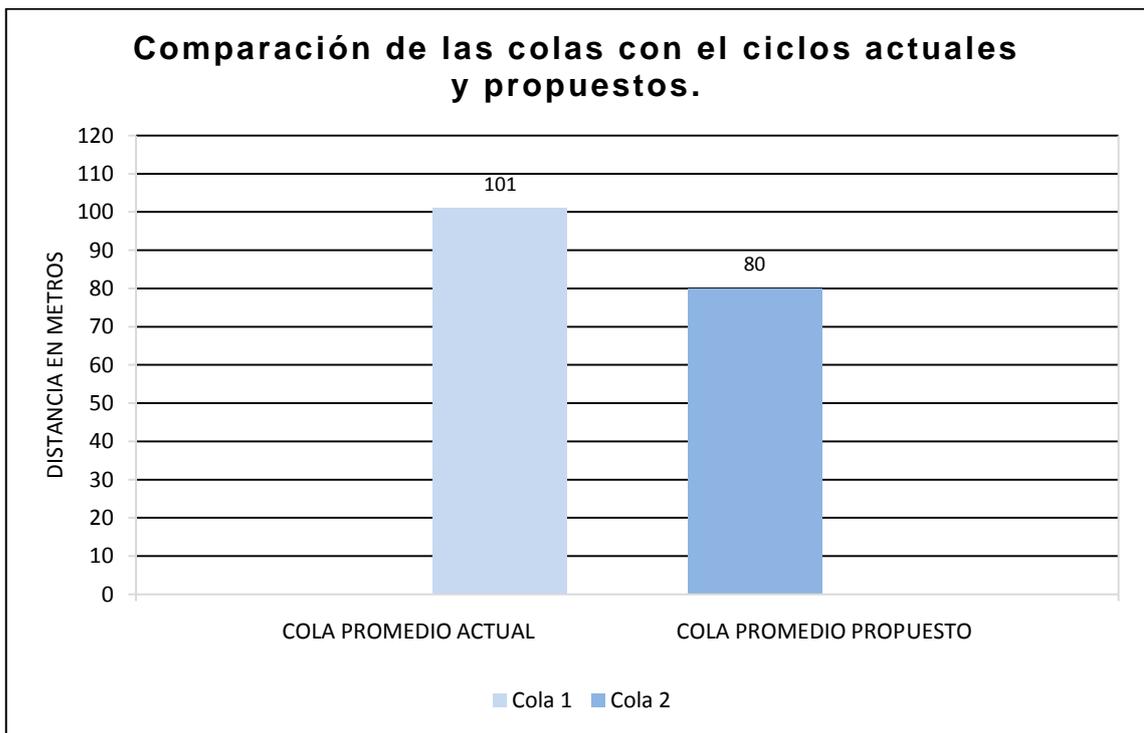


Figura 4-3: Análisis de colas con los ciclos actuales y propuestos

4.4 Análisis de los niveles de servicio dentro de la intersección.

Los análisis de los niveles de servicio se determinaron principalmente a través del volumen vehicular existente en toda la intersección, se llega a determinar que con el ciclo propuesto de 90 segundo el nivel de servicio mejora de categoría al tipo E.

Tabla 4-3: Nivel de Servicio Actual y Propuesto.

Tiempos de espera actuales y propuestos para determinar los niveles de servicio dentro de la intersección.					
Ciclo 120 segundos			Ciclo 90 segundos		
Actual			Propuesto		
Sentido	Tiempo de espera (seg)	Nivel de servicio	Sentido	Tiempo de espera (seg)	Nivel de servicio
Norte-Sur	87	Tipo F	Norte-Sur	72	Tipo E
Norte-Este	93	Tipo F	Norte-Este	81	Tipo F
Oeste-Este	81	Tipo F	Oeste-Este	63	Tipo E
Oeste-Norte	93	Tipo F	Oeste-Norte	78	Tipo E

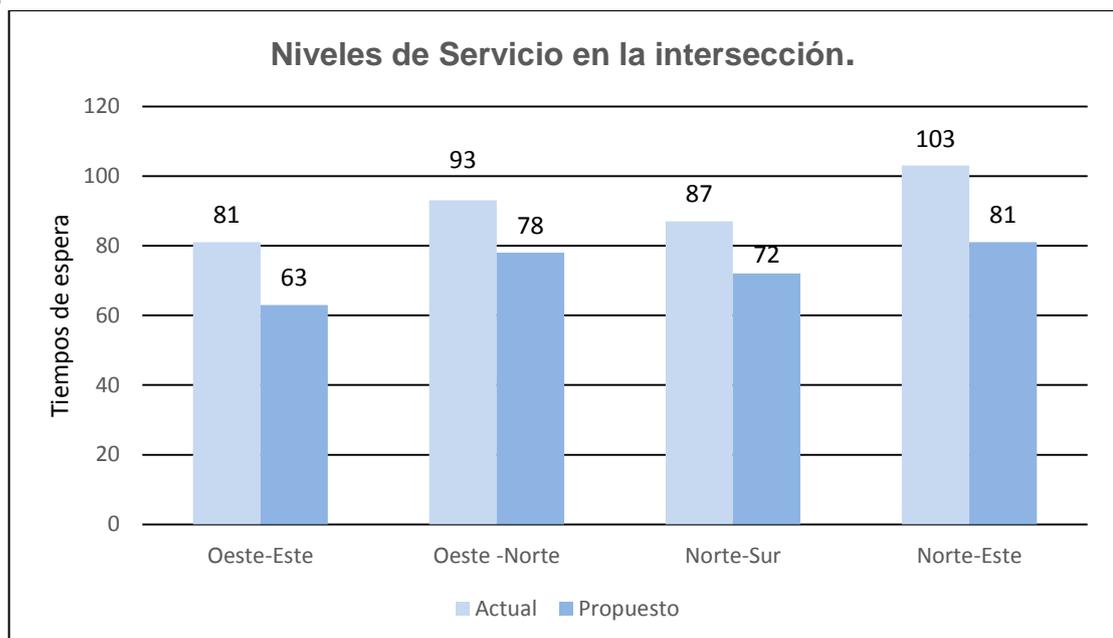


Figura 4-4: Niveles de servicio en la intersección.

4.5 Análisis del consumo de combustible y emisiones.

4.5.1 Análisis del consumo de combustible promedio en la intersección.

En la siguiente tabla se representa los factores de ajuste por presencia de vehículos pesados promedios dentro de la intersección, en cada uno de los sentidos con sus respectivos porcentajes.

Tabla 4-4: Promedio de factores de ajuste en toda la intersección.

Sentidos	Vehículos livianos %	Vehículos SUV %	Buses y camiones %
Norte-Sur	62,40	26,44	11,16
Sur-Norte	63,76	28,12	8,12
Este-Oeste	55,86	35,9	8,24
Oeste-Este	56,99	31,68	11,33
PROMEDIO	59,75	30,33	9,71

A continuación se representa los tiempos de espera del ciclo actual y el propuesto para obtener la disminución del tiempo de espera promedio en la intersección.

Tabla 4-5: Disminución del tiempo de espera promedio en la intersección.

Sentidos	Tiempo de espera con ciclo actual 110 seg (veh/ciclo).	Tiempo de espera con ciclo propuesto 90 seg (veh/ciclo).	Disminución del tiempo de espera en seg.
Norte-Sur	87	72	15
Sur-Norte	93	81	12
Este-Oeste	81	63	18
Oeste-Este	93	78	15
Promedio Total	88,5	73,5	15

Para el cálculo del consumo de combustible se toma en cuenta que el número de vehículos diarios que circulan dentro de la intersección tanto para el ciclo actual como el propuesto es el mismo, por lo que se utiliza la cola promedio, el ciclo actual y las horas de circulación de los vehículos en la intersección.

Cálculo de vehículos diarios:

$$15 \text{ vehiculos} * \frac{33 \text{ ciclos}}{1 \text{ hora}} * \frac{14 \text{ horas}}{1 \text{ dia}} = 6930 \text{ vehiculos}$$

Tabla 4-2: Número de vehículos equivalentes por factor de ajuste de cada tipo.

Vehículos al día	Tipo de vehículo	% factor ajuste	Total vehículos
6930	Liviano	59,75	4.141
	SUV	30,33	2.102
	Buses	9,71	673

A continuación se calculan los valores del consumo de combustible en ralentí para los diferentes tipos de vehículos que circulan por la intersección, estos valores son representados en galones al año.

Cálculo del consumo del combustible promedio en ralentí para los vehículos livianos en la intersección.

$$\frac{4.141 \text{ veh}}{\text{día}} \times \frac{15 \text{ seg.}}{\text{veh}} \times \frac{204 \text{ mlgr}}{\text{seg.}} = 12'671.460 \frac{\text{mgr.}}{\text{día}}$$

$$12'671.460 \frac{\text{mgr.}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ gr}}{1000 \text{ mgr}} = 12.671,46 \frac{\text{gr.}}{\text{día}}$$

$$12.671,46 \frac{\text{gr.}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{0,68 \text{ gr}} = 18.634,5 \frac{\text{cm}^3}{\text{día}}$$

$$18.634,5 \frac{\text{cm}^3}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ cm}^3} = 4,92 \frac{\text{gal}}{\text{día}}$$

$$4,92 \frac{\text{gal}}{\text{día}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 1.797 \frac{\text{gal}}{\text{año}}$$

En la ecuación anterior se realiza el análisis del consumo promedio de combustible en ralentí de vehículos livianos por sentido dentro de la intersección, donde se estima un ahorro de combustible promedio de 7.188 galones en toda la intersección al año.

Cálculo del consumo del combustible promedio en ralentí para los vehículos SUV a gasolina en la intersección.

$$\frac{2102 \text{ veh}}{\text{día}} \times \frac{15 \text{ seg.}}{\text{veh}} \times \frac{291 \text{ mgr}}{\text{seg.}} = 9'175.230 \frac{\text{mgr.}}{\text{día}}$$

$$9'175.230 \frac{\text{mgr.}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ gr}}{1000 \text{ mgr}} = 9.175,23 \frac{\text{gr.}}{\text{día}}$$

$$9.175,23 \frac{\text{gr.}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{0,68 \text{ gr}} = 13.492,98 \frac{\text{cm}^3}{\text{día}}$$

$$13.492,98 \frac{\text{cm}^3}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ cm}^3} = 3,56 \frac{\text{gal}}{\text{día}}$$

$$3,56 \frac{\text{gal}}{\text{día}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 1.301 \frac{\text{gal}}{\text{año}}$$

De acuerdo con los cálculos del consumo promedio de combustible en ralentí de vehículos SUV, se estima un ahorro de combustible promedio de 5.204 galones al año en toda la intersección.

Cálculo del consumo del combustible promedio en ralentí para los vehículos a diésel (Buses) en la intersección.

$$\frac{673 \text{ veh}}{\text{día}} \times \frac{15 \text{ seg.}}{\text{veh}} \times \frac{620 \text{ mgr}}{\text{seg.}} = 6'258.900 \frac{\text{mgr.}}{\text{día}}$$

$$6'258.900 \frac{\text{mgr.}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ gr}}{1000 \text{ mgr}} = 6.258,9 \frac{\text{gr.}}{\text{día}}$$

$$6.258,9 \frac{\text{gr.}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{0,85 \text{ gr}} = 7.363,41 \frac{\text{cm}^3}{\text{día}}$$

$$7.363,41 \frac{\text{cm}^3}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ cm}^3} = 1,95 \frac{\text{gal}}{\text{día}}$$

$$1,95 \frac{\text{gal}}{\text{día}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 710 \frac{\text{gal}}{\text{año}}$$

El análisis del consumo promedio de vehículos a diésel en toda la intersección genera un ahorro estimado de 2840 galones al año.

Tabla 4-7: Ahorro de combustible promedio en toda la intersección.

Tipo de vehículo	Tipo de combustible	Ahorro del consumo (gal/año)	Total (gal/año)
Liviano	Gasolina	7.188	12.392
SUV	Gasolina	5.204	
Buses	Diésel	2.840	2.840

De la tabla anterior se puede estimar que el consumo de combustible promedio en ralentí de vehículos a gasolina (livianos y SUV) es de 12.392 galones al año, mientras el consumo de diésel en buses y camiones es de 2.840 galones al año., tomando en cuenta que el costo del galón de gasolina extra y súper es de 1,48\$ y 2,26\$ respectivamente, mientras que el de diésel es de 1,03\$ y que el 25% de la población utiliza gasolina súper, se estima que el ahorro de gasolina es 20.756\$ y diésel es de 2.925\$, aproximadamente se genera un ahorro de 23.681\$ en toda la intersección con la metodología propuesta.

4.5.2 Análisis de las emisiones de CO₂ promedio de la intersección.

Con el consumo de combustible promedio obtenido de los tipos de vehículos que circulan en toda la intersección, se realiza una conversión de galones al año a toneladas de CO₂ a través de las siguientes ecuaciones.

Cálculo de las emisiones de CO₂ promedio en ralentí para los vehículos a gasolina en la intersección.

$$12.392 \frac{\text{galones}}{\text{año}} \times \frac{3,78 \text{ litros}}{1 \text{ galón}} = 46.841,76 \frac{\text{litros}}{\text{año}}$$

$$46.841,76 \frac{\text{litros}}{\text{año}} \times \frac{2370 \text{ gr } CO_2}{1 \text{ litro}} = 111'014.971,2 \frac{\text{gr } CO_2}{\text{año}}$$

$$111'014.971,2 \frac{\text{gr } CO_2}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ tonelada}}{10^6 \text{ gr}} = 111 \frac{\text{toneladas } CO_2}{\text{año}}$$

Cálculo de las emisiones de CO₂ promedio en ralentí para los vehículos a diésel en la intersección.

$$2.840 \frac{\text{galones}}{\text{año}} \times \frac{3,78 \text{ litros}}{1 \text{ galón}} = 10.735,2 \frac{\text{litros}}{\text{año}}$$

$$10.735,2 \frac{\text{litros}}{\text{año}} \times \frac{2650 \text{ gr CO}_2}{1 \text{ litro}} = 28'448.280 \frac{\text{gr CO}_2}{\text{año}}$$

$$28'448.280 \frac{\text{gr CO}_2}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ tonelada}}{10^6 \text{ gr}} = 28 \frac{\text{toneladas CO}_2}{\text{año}}$$

Con la metodología propuesta se evita una emisión promedio de 139 toneladas de CO₂ al medio ambiente.

5. CONCLUSIONES

Con la metodología propuesta de 90 segundos para la intersección de las Avenidas Mariano Acosta y Jaime Rivadeneira, se pudo apreciar una mejora con respecto a la situación real de movilidad dentro de esta, disminuyendo el tiempo de espera, la cola, los niveles de servicio y el volumen vehicular. El tiempo de espera promedio dentro de la intersección se redujo en un 17%, generado un flujo de vehículos idóneo para los conductores, por la disminución de la demora, evitando el aumento del estrés ocasionado por la congestión de vehículos en las principales horas pico. Por medio de la reducción de la cola se logra un beneficio ambiental, gracias a que el flujo de vehículos es continuo y además no producirá demoras excesivas, generando una mejora en la calidad del aire al reducir los gases tóxicos producidos por el transporte público y privado. El nivel de servicio dentro de la intersección mejoró con la metodología propuesta del tipo F (donde el flujo de llegada excede la capacidad de los accesos de la intersección ocasionados por ciclos muy largos) al tipo E (considerado con el límite de demoras, causadas por progresiones pobres). El ahorro del consumo de combustible dentro de la intersección con la metodología propuesta se estima es de 15.232 galones al año, generando un ahorro monetario para el GAD Ibarra y el gobierno del Ecuador en un estimado de 23.681\$ anuales dentro de la intersección en todos sus sentidos y se evita 139 toneladas de CO₂ al medio ambiente.

6. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- AGUILERA, R. F. (2014). *TEMAS DE INGENIERÍA Y GESTION DE TRÁNSITO*. Santiago: RIL editores.
- Bo Yang, R. Z. (2016). Evaluation of the effects of in-vehicle traffic. *IET Intelligent Transport Systems*.
- Cal, R., Mayor, R., & Cardenas, J. (2007). *Ingenieria de Transito*. Mexico D.F.: Alfaomega.
- Castañeda, M. (2013). Ingeniería del Tránsito y Transporte. *Academia*, Pag. 27.
- EPA, A. d. (2008). Emission Facts. *Oficina de Transporte y Calidad del Aire*, 1-6.
- Estuardo, C. B. (2012). *PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EVALUAR INTERSECCIONES SEMAFÓRICAS*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- FERNÁNDEZ, R. (2008). *Elementos de la teoría de flujos vehiculaes*. Santiago: Lom ediciones.
- Frances Sprei, S. K. (2008). Better performance or lower fuel consumption. *Elsevier.*, 75 - 85.
- Fredy A. Rosero Obando, C. E. (2017). Análisis del consumo de combustible en autobuses urbanos por efecto de las intersecciones semaforizadas, caso de estudio ciudad de Ibarra. *Delos.*, 1 - 20.
- GmbH, R. B. (2005). *Manual de la Técnica del Automóvil*. Alemania: Karl-Heinz Dietsche.
- H.Christopher Frey, N. M. (2007). Comparing real-world fuel consumption for diesel- and hydrogen-fueled transit buses. *Elsevier*, 283 - 288.
- IDAE, I. P. (2016). *Manual de conduccion eficiente*. Sevilla: Andaluz.
- INEN, I. E. (2012). *SEÑALIZACIÓN VIAL, PARTE 5, SEMAFORIZACIÓN*. Quito: INEN.
- Jerez Hernandez, A. G., & Morales Santos, O. E. (2015). *Analisis del nivel de servicio y capacidad vehicular de las intersecciones con mayor demanda en la ciudad de Azogues*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- Manual, H. C. (2000). *transportation Research Board*. Washington: National Research Council.
- MEP. (2016). *UBICACION SEMAFÓRICA CIUDAD BLANCA. CANTON IBARRA: MEP (EMPRESA PÚBLICA DE MOVILIDAD)*.
- Rita Peñabaena, V. C. (2015). Impact of transition between signal timing plans in social cost. *Transportation Research*, 445 - 456.
- Sempertelli, J. F. (2012). *SISTESIS DE INTERSECCIONES, SEÑALIZACION Y SEMÁFOROS. CUENCA*.
- Wing-Tat Hung, H.-Y. T.-S. (2005). A Modal Approach to Vehicular Emissions and Fuel. *Air & Waste Management Association.*, 1431 - 1440.
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2013). *FÍSICA UNIVERSITARIA*. MÉXICO: PEARSON.

