



Grupo eumed.net / Universidad de Málaga y
Red Académica Iberoamericana Local-Global
Indexada en IN-Recs (95 de 136), en LATINDEX (33 DE 36), reconocida por el DICE, incorporada a la
base de datos bibliográfica ISOC, en RePec, resumida en DIALNET y encuadrada en el Grupo C de la
Clasificación Integrada de Revistas Científicas de España.

Vol 10. N° 29
Junio 2017

www.eumed.net/rev/delos/29

ANÁLISIS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN AUTOBUSES URBANOS POR EFECTO DE LAS INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS. CASO DE ESTUDIO CIUDAD DE IBARRA

Fredy A. Rosero Obando¹

Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador
farosero@utn.edu.ec

Christian E. León Cárdenas²

Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador
celeon@utn.edu.ec

Zamir A. Mera Rosero³

Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador
zamera@utn.edu.ec

Carlos X. Rosero Chandi⁴

Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador
cxrosero@utn.edu.ec

Ecuador

CONTENIDO

Resumen	2
Abstract	2
1. Introducción.....	3
2. Fundamentación teórica.....	5
3. Metodología	6
3.1 Caracterización de Flota de Autobuses de la ciudad.	7
3.2 Inventario de características de cada ruta.	7
3.3 Selección de ruta por densidad (semáforos/km)	7
3.4 Levantamiento de velocidades y tiempos de espera en semáforos y en ruta.....	9
3.5 Estimación consumo de combustible instantáneo en los Autobuses	10
3.6 Cálculo del Consumo de Combustible por Intersecciones semaforizadas.....	13
4. Análisis de resultados	15
5. Conclusiones.....	20
6. Referencias bibliográficas	21

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo estimar el efecto de las intersecciones semaforizadas en el consumo de combustible de los autobuses de la ciudad de Ibarra, para ello se plantea una metodología de seis etapas. En la primera parte se realizó una caracterización de la flota de 287 autobuses y las 25 rutas urbanas de la ciudad. Para el desarrollo del estudio, se eligió la Ruta Católica-Alpachaca, considerado como el recorrido que presenta el mayor número de semáforos por kilómetro. Después, se levantaron los datos de velocidades en ruta y tiempos de espera en semáforos. Así, se obtuvo el porcentaje de los cuatro estados de conducción de los autobuses y el consumo instantáneo en cada uno de ellos, logrando estimar que las intersecciones semaforizadas generan el 22% del consumo de combustible de los autobuses. En la parte final, se propuso el remplazo del 25% de las intersecciones de la ruta por algún otro tipo de señal de prioridad, de preferencia por señales de ceda el paso. Aplicando esta estrategia, se calculó una disminución del 6% del consumo de combustible en la ruta de estudio, y un ahorro anual de 85.000 galones de diésel si se consideran todas las rutas de buses de la ciudad.

Palabras Claves: autobuses urbanos, congestión vehicular, consumo de combustible, intersecciones semaforizadas, sistemas de transporte.

Clasificación JEL: L92,L62, R41, R48

ABSTRACT

The foregoing project has been performed to estimate the effects of the traffic-lighted intersections in the fuel consumption of the public transport buses from the city of Ibarra, a six-stage methodology is proposed in order to achieve it. In the first stage, the characterization of the 287 buses fleet and the 25 urban routes across the city, was performed. The study was developed in the Católica-Alpachaca route, which is the path that has the highest number of traffic lights per kilometer within all routes on analysis. Speed data gathering on route and traffic light waiting time measure was performed afterwards. This made possible to obtain a percentage for each one of the four driving states and the instant fuel consumption for each one of the tested transport units. As a result of the aforementioned work, traffic-lighted intersections generate an estimated 22% of the total fuel consumption on the buses. In the latter part of the study, it is proposed to replace the 25% of the route intersections with any other type of priority sign, preferably with a yield sign. With such changes, a 6% reduction in the fuel consumption might be achieved. If this strategy is applied for all the bus routes in the city, the total fuel expenditure could decrease in about 85.000 gallons of diesel fuel.

Keywords: Urban buses, vehicular congestion, fuel consumption, traffic-light intersections, transportation systems.

JEL classification: L92,L62, R41, R48

1 INTRODUCCIÓN.

Las intersecciones de Tráfico son zonas que están diseñadas para que los vehículos puedan circular en diferentes direcciones y generalmente están sujetas a diferentes políticas de control de tránsito, tales como: gestión del tráfico, semáforos y señales de pare (Peñabaena-Niebles, 2015). Las nuevas políticas deben promover el uso eficiente de energía, mediante la reducción de consumo de combustible y la disminución de la producción de gases de efecto invernadero, para tener un desarrollo sostenible de las ciudades durante los siguientes treinta años. Sin embargo, las estadísticas muestran que los esfuerzos realizados hasta el momento por las autoridades de control de tránsito y transporte a nivel mundial, siguen siendo insuficientes para resolver o aliviar problemas relacionados a la congestión vehicular. Los efectos más significantes suelen ser el costo asociado al aumento en tiempos viaje y el incremento del consumo de combustible.

En el ámbito mundial el consumo de combustible generado por el tráfico de transporte cada día sigue aumentando, y el consumo diario se prevé que llegará a 60 millones de barriles en 2035, lo que representa que el 61% de la producción total de petróleo. El sector del transporte es responsable de más del 20 % de todo el consumo mundial de energía, en especial los derivados del petróleo (IEA, 2012). Por otro lado, los operadores de autobuses urbanos y suburbanos los costos de energía representan una parte importante, de alrededor del 10 % de los costos totales de (Cubukcu, 2008). Según el Informe de Movilidad Urbana 2011 de los Estados Unidos, se estima que los niveles de congestión por tráfico se han incrementado cuatro veces en las zonas urbanas en los últimos 28 años, además que en el año 2010 el retardo total para los viajeros en zonas urbanas llegó a 4.8 millones de horas y que el consumo de combustible fue de 1,9 mil millones de galones, con un costo total aproximado de \$101 mil millones debido a la congestión (Peñabaena-Niebles, 2015).

En Ecuador, el balance energético calculado cada año por el Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos muestra que el sector transporte es el mayor consumidor de combustibles en el país. En el año 2012, el consumo total de combustible del país fue de aproximadamente 57 millones de barriles de petróleo equivalentes (BOE), donde los combustibles más demandados fueron: diésel, gasolina convencional y premium, queroseno y fuel oil. En el mismo año, la demanda del sector de transporte representó alrededor de 77% del importe total. Dentro del sector del transporte, el transporte por carretera es el más significativo en términos de consumo de energía, ya que demanda más del 80% de las necesidades totales del sector (Cevallos, 2016).

Además, cabe mencionar, que en el país los combustibles son subsidiados por el Gobierno Central y se comercializan a un valor inferior respecto a otros países de la región y del mundo; desde el punto de vista económico este valor se ha convertido en una gran carga financiera para el estado central, la situación económica actual del país ha hecho que dichos subsidios sean casi insostenibles para el Estado central. Si se analiza la movilidad del Ecuador, los bajos precios del combustible han ocasionado que los patrones de movilidad actual, muestren claras preferencias por

el transporte individual como el auto privado, el taxi o la motocicleta, dejando el uso del transporte masivo relegado a grupos sociales de escasos recursos económicos.

En actualidad la ciudad de Ibarra presenta una creciente contaminación de su atmósfera, causada principalmente por la utilización de automotores que funcionan en base a combustibles fósiles. De ellos se pueden identificar tres componentes claves en el nivel de contaminación del aire de la ciudad: en primer lugar, está la baja calidad de combustible suministrado, luego el incremento de congestión vehicular, tercero la situación geográfica en la que se encuentran la ciudad, que no permite un rendimiento óptimo de los motores de combustión. En estos últimos años además se han sumado otros factores, entre ellos se puede citar el proceso de semaforización indiscriminada de varias intersecciones, situación que ha generado que en intersecciones del hipercentro de Ibarra los vehículos formen grandes colas a la espera de avanzar hacia su destino, en horas pico esta problemática se hace más evidente, y como consecuencia los usuarios de autobuses ha sido uno de los grupos más afectados pues están expuestos a grandes demoras en sus tiempos de viaje.

Los semáforos fueron instalados sin haber desarrollado previamente un estudio técnico de tráfico; en la configuración de los tiempos de ciclo de verde de los semáforos no se ha tomado en cuenta las variaciones del flujo vehicular que se tiene lo largo de un día, ni tampoco se ha considerado dar cierto nivel de preferencia a la vía por la cual circulan automotores de transporte masivo. Los autobuses son generalmente "más verdes" que los autos privados y los taxis, pues permiten disminuir la congestión del tráfico, el consumo de combustible, las emisiones de dióxido de carbono y del costo de viaje (Chen,Zhang, 2015). Cabe mencionar que una correcta temporización de intersecciones semaforizadas no solo permite mejorar las mediciones de flujo de tráfico, sino también disminuir los factores de consumo de combustible y de emisiones de gases de efecto invernadero.

En el caso de las Empresas operadoras de autobuses, el consumo de combustible representa una parte importante en sus costos de operación; para la optimización de dichos recursos se debe analizar desde las características técnicas de los vehículos hasta el desempeño y estilo de manejo de los conductores, por ello el estudio para la reducción del consumo de combustible representa en la actualidad una de las principales preocupaciones las operadoras de flotas de autobuses. La mejora del estilo de conducción de los conductores de autobuses y la puesta en práctica de normas de mantenimiento rigurosos son las principales formas para lograr no sólo la reducción de costos de combustible, sino también mitigar impactos ambientales y mejorar la seguridad vial.

Por lo tanto, la identificación de los factores que afectan significativamente el consumo de combustible el bus en funcionamiento es una herramienta de gestión significativa para estas empresas (de Abreu e Silva, 2015). De acuerdo a lo mencionado anteriormente, el presente estudio busca analizar el consumo de diésel de los autobuses urbanos asociado a los tiempos de espera generados por las intersecciones semaforizadas, como una herramienta que permita a las autoridades de control de tránsito y transporte evaluar la configuración de intersecciones

semaforizadas y también las operadoras de autobuses puedan optimizar los gastos generados por consumo de combustible.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Los trabajos relacionados con el presente tema de investigación son aquellos que analizan el incremento de consumo de combustible de un vehículo ocasionado por diferentes factores de tráfico. En el primer trabajo citado, se desarrolla una función matemática para cuantificar el impacto monetario del diseño de etapas de semáforos y el medio ambiente. Esta función ofrece un enfoque para reducir problemas como incrementos de tiempo de viaje, emisiones contaminantes y consumo de combustible vehicular de los viajes. Además, analiza las relaciones entre la demora, el consumo de combustible y emisiones de gases y el número de pasos necesarios para lograr tiempos de semáforo eficiente (Peñabaena-Niebles, 2015).

En otro trabajo de este tipo se evalúa los efectos en el consumo de combustible y emisiones al reemplazar pequeños redondeles por intersecciones semaforizadas y señales de ceda el paso; los resultados obtenidos fueron que al reemplazar una intersección semaforizadas por redondeles se logra disminuir el 28% de consumo de combustible, 29% de emisiones CO, y 21% de NOx; en cambio al reemplazar el redondel por señales de Ceda el Paso existió un incremento del 3% en consumo de combustible, 4% de emisiones CO, y 6% de NOx. El método empleado para analizar el comportamiento del vehículo en la intersección es el "car following" (Várhelyi, 2002), que consiste en determinar cómo los vehículos se suceden en una carretera. Para ello un vehículo mantiene un espacio mínimo y un espacio de tiempo respecto a otro vehículo que va situado en la parte delantera; en condiciones de congestión, cuando el auto delantero cambia su velocidad, el siguiente vehículo también varía su velocidad en un punto en el espacio-tiempo a lo largo de la velocidad de la ola de tráfico que se presenta en la carretera.

Un tercer trabajo asociado al estudio, realiza una investigación empírica sobre los costos de operación del tránsito de los autobuses e identifica los factores claves que influyen en la eficiencia energética de la flota en general de un operador y ayuda a la gestión y manejo de sus recursos. Se estima un conjunto de modelos de regresión multivariantes, usando conjunto de datos de 488 conductores de autobuses que operan más de 92 días en 2010, en 87 rutas con diferentes tipologías de autobús, de una empresa de transporte que operan en el área metropolitana de Lisboa. En sus resultados se confirman la existencia de las variables influyentes en relación con la eficiencia energética y estos son principalmente: tipo de vehículo, la velocidad comercial, pendientes del camino más de 5% y autobús; y en menor medida la conducción, eventos tales como: desaceleración repentina longitudinales y rotación excesiva del motor. La metodología ha demostrado ser útil para el operador del autobús como herramienta de decisión-soporte para fines de optimización y eficiencia a nivel de empresa (de Abreu e Silva, 2015).

Además, se puede citar un trabajo en el que se investiga el consumo de combustible por las características de operaciones de autobuses en carriles exclusivos en las calles de una ciudad en regular; allí se identifican las causas probables de la ineficiencia, y se proponen las mejoras posibles. Los datos de consumo de combustible se recogen mediante el uso de un sistema de emisiones de medición a bordo (OEM) en un autobús mientras este está en servicio. Los resultados del estudio muestran que un autobús en un carril exclusivo para buses ahorra más energía cuando se opera en bloques medios, debido a la reducción de la fricción del resto del tráfico de la carretera; y tiene un alto porcentaje de tiempo perdido debido a las paradas y las demoras en intersecciones. Las mejoras para el aprovechamiento de la energía y la eficiencia operativa pueden incluir el rediseño de la señalización de tráfico, la renovación de la estación de autobuses de diseño / operaciones, y la enseñanza de la conducción eficiente para conductores de autobús. Se sugiere crear políticas para promover el uso de flotas de autobuses de alta eficiencia energética, especialmente en ralentí y aceleración / deceleración, también serían útiles para el ahorro de combustible en las operaciones de las calles de la ciudad (Hu, Lin, Chen, 2012).

Un último trabajo que se menciona es aquel en el que se usa también el modelo “car-following”, en este caso para representar el estado de la carretera en tiempo real para explorar el impacto de la rampa sobre el consumo de combustible de los vehículos en la carretera principal en un flujo uniforme. Los resultados numéricos demuestran que la rampa puede incrementar el consumo de combustible de cada vehículo y en la carretera principal y que los incrementos están relacionados con el estado del tráfico de la carretera principal y que el incremento está relacionado al estado del tráfico del camino principal y del de la entrada a la rampa (Tang, Li, Yang, 2015).

3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta en el presente trabajo se compone de seis etapas según se muestra en la Fig. 1.

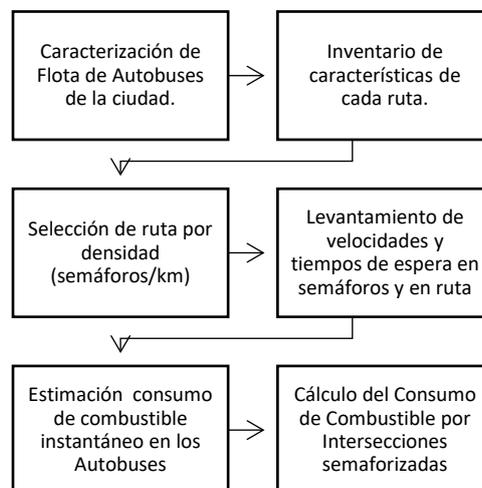


Fig. 1 Metodología para estimar el efecto de las intersecciones semaforizadas en el consumo de combustible

3.1 Caracterización de Flota de Autobuses de la ciudad.

En primer lugar, se realiza una caracterización de la flota vehicular de las operadoras de Autobuses de la ciudad de Ibarra. Allí se toma en cuenta aspectos del vehículo como: marca, modelo, año fabricación, tipo de motor y carrocería. Los datos fueron facilitados por la Empresa Pública de Movilidad MOVIDELNOR-EP, quienes son los encargados de manejar las competencias de planificación, gestión, y control del Tránsito, Transporte Terrestre y Seguridad vial en la Cantón Ibarra. En esta etapa es importante identificar cuáles son los modelos de vehículos que predominan el parque de autobuses de la ciudad. Actualmente existen en circulación 287 vehículos, 160 corresponden a la Cooperativa 28 de septiembre y 127 a la Cooperativa San Miguel de Ibarra. Identificar la marca de vehículo predominante también ayuda a tener un mejor criterio en la selección de los vehículos para la recolección de datos. En la Fig. 2 se presenta la clasificación de los autobuses por marca de fabricante.

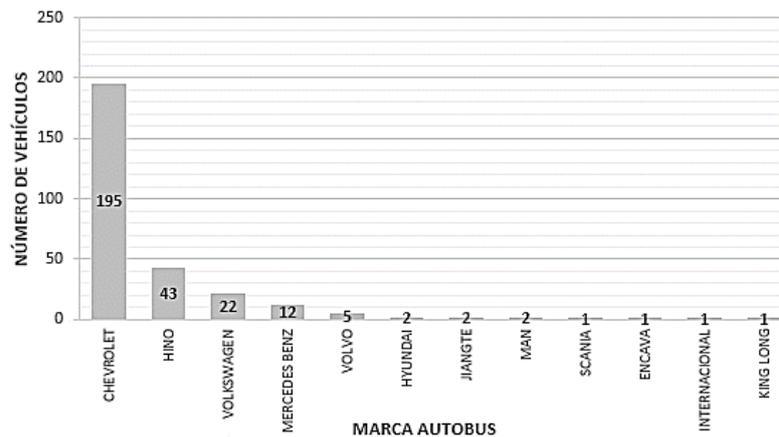


Fig. 2. Clasificación por Marca de fabricante de los Autobuses de ciudad de Ibarra

3.2 Inventario de características de cada ruta.

En la segunda etapa es necesario realizar un inventario de las 24 rutas de los autobuses de la ciudad, la Operadora 28 de Septiembre tiene 16 rutas y la Operadora San Miguel de Ibarra 8 rutas. El inventario desarrollado recoge características de la ruta tales como: Kilometraje recorrido y tiempo de viaje por ciclo, consumo de combustible diario, cabe mencionar que la modalidad actual de trabajo de las operadoras en Ibarra contempla que a un autobús se le asigna diariamente únicamente una ruta, y solo puede ser cambiada en el transcurso del día en casos muy excepcionales. La asignación de rutas y los horarios de inicio y fin de recorrido están preestablecidos mediante una Tabla de Trabajo que posee cada operadora. Además, en esta etapa se realiza un conteo del número de intersecciones semaforizadas por ruta como parte del inventario desarrollado. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 1.

3.3 Selección de ruta por densidad (semáforos/km)

En la tercera etapa se debe seleccionar una ruta para realizar el levantamiento de tiempos de espera en los semáforos y lograr desarrollar el presente estudio. Para ello, a partir del inventario obtenido se ordenan de forma descendente las 24 rutas de las operadoras, bajo dos factores; el primero relaciona el número de semáforos respecto a kilómetros recorridos, y el segundo relaciona tiempo de viaje a kilómetros de recorrido. El cálculo de los factores de se puede representar mediante la Ec.1 y la Ec.2.

$$Fd_{Ruta} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_s)}{(D_r)} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

Fd_{Ruta} = factor semáforos por km en una ruta i

N_s = semáforos en una intersecciones de la ruta

D_r = distancia de la ruta

$$Ft_{Ruta} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_r)}{(D_r)} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

Ft_{Ruta} = factor minutos por km en una ruta i

T_s = tiempo de viaje de la ruta

D_r = distancia de la ruta

Luego de ordenar las rutas se procede a seleccionar una de ellas para desarrollar el presente estudio; según se muestra en la Tabla I. La ruta Católica -Alpachaca es aquella que posee un mayor número de semáforos por kilómetro recorrido y presenta un mayor número de semáforos por tiempo de viaje, por tal motivo es la ruta seleccionada para el desarrollo del presente trabajo.

Tabla I. Inventario de características de rutas de autobuses de Ibarra

No	LINEA	RECORRIDO TOTAL COTIDIANO			NÚMERO DE SEMAFOROS	FACTOR	
		OPER	DISTANCIA (km)	TIEMPO (min)		SEM/Km	min/Km
1	CATOLICA - ALPACHACA	28S	15,9	78	53	3,3	4,9
2	PUGACHO - SANTA TERESITA	28S	18,7	100	55	2,9	5,3
3	IAS PALMAS - LOS CEIBOS	28S	19,7	84	51	2,6	4,3
4	COLINAS DEL SUR - ADUANA	SM	23,4	95	58	2,5	4,1
5	AZAYA - LA CAMPIÑA	28S	19,4	96	45	2,3	4,9
6	SAN FRANCISCO	28S	18,8	83	42	2,2	4,4
7	CHUGCHUPUNGO - LA FLORIDA	SM	24,8	170	53	2,1	6,9
8	LOS SOLES	28S	27,4	131	57	2,1	4,8
9	CARANQUI - ADUANA	28S	26,8	104	55	2,1	3,9
10	LA ESPERANZA - H. SEGURO	SM	24,25	100	48	2,0	4,1
11	SANTA LUCIA - LA VICTORIA	SM	23,2	80	45	1,9	3,4
12	EL CARMEN - BELLAVISTA	28S	22,4	80	43	1,9	3,6
13	CHORLAVI - LA VICTORIA	28S	29,9	110	57	1,9	3,7
14	19 DE ENERO - ODILAS	SM	28,4	130	52	1,8	4,6
15	EJIDO DE CARANQUI - MIRAVALLE	SM	28,7	70	51	1,8	2,4
16	STO DOMINGO - UNIVERSIDADES	SM	28,7	162	51	1,8	5,6
17	MILAGRO - YAHUARCOCHA	28S	33,7	113	59	1,8	3,4
18	ARCANGEL - SAN CRISTOBAL	28S	30,4	120	51	1,7	3,9
19	SANTA ROSA - LOS CEIBOS	28S	21,2	105	32	1,5	5,0
20	TANGUARIN - ADUANA	28S	34,5	138	52	1,5	4,0
21	ALBURO	28S	19,4	85	26	1,3	4,4
22	STALISABEL - HUERTOS FAMILIARES	28S	39,9	131	51	1,3	3,3
23	NARANJITO	28S	20,6	90	25	1,2	4,4
24	CARANQUI - UNIVERSIDADES	SM	20,2	80	43	2,1	4,0

La ruta Católica -Alpachaca se muestra en la Fig. 3, tiene una longitud de 15.9 Kilómetros, el tiempo aproximado de recorrido es 90 minutos por vuelta y tiene 55 intersecciones semaforizadas. Además, la trayectoria tiene una variación de altitud entre 2198 y los 2295 metros sobre el nivel del mar, con una pendiente máxima de 13%.

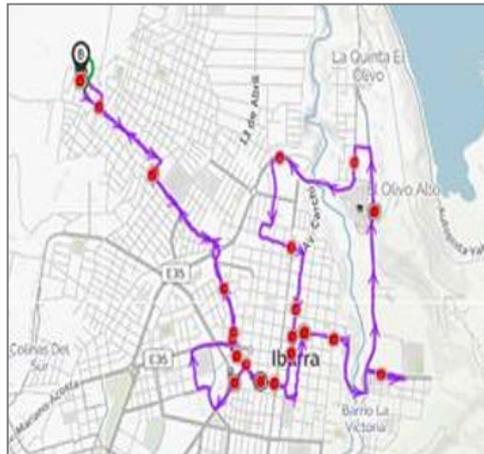


Fig. 3 Trayectoria de ruta Católica-Alpachaca

En el caso de existir varias rutas que tengan valores similares de densidad semáforos/km y se tiene dudas en la decisión final de la selección de ruta, se sugiere analizar los recorridos y dar preferencia a la ruta que cubra más áreas del hipercentro de la ciudad, pues allí se encuentra una mayor concentración de intersecciones semaforizadas y los tiempos de espera también son mayores y por ende el consumo de combustible de los autobuses también aumenta.

3.4 Levantamiento de velocidades y tiempos de espera en semáforos y en ruta

En la cuarta etapa en la ruta seleccionada Católica-Alpachaca se realiza el levantamiento de tiempos de espera en intersecciones semaforizadas y paradas. En el presente estudio se adquieren datos a bordo del autobús, y de forma externa en las vías de las intersecciones semaforizadas. La recolección de datos se realizó durante el mes de Enero del 2017, considerando que en esta época del año los patrones del flujo de pasajeros en la ciudad y en el sistema de autobuses es bastante normal; pues los estudiantes asisten con regularidad a sus Centros Educativos, y la mayoría de empleados han retornado de sus vacaciones y viajan diariamente a sus lugares de trabajo. Cada día se monitoreó 4 buses, desde las 6h00 hasta las 19h00, considerando que diariamente un autobús realiza aproximadamente 8 vueltas al recorrido de la ruta Católica-Alpachaca, se obtiene un registro por vehículo de 32 vueltas al día.

La información a bordo del autobús se obtiene de forma manual y mediante el uso de aplicaciones GPS para teléfono móvil. Los datos manuales se levantan mediante formularios, allí una persona cronometra y registra los tiempos de detención del autobús, ya sea por efecto de una intersección semaforizada o también por paradas requeridas por los pasajeros. Para obtener otra

información se utiliza una aplicación para smartphones denominada MycarTrack®, esta herramienta permite levantar los ciclos de conducción de un vehículo en su recorrido, además muestra estadísticas importantes de un viaje tales como: velocidad promedio, velocidad promedio en movimiento, distancia total, velocidad máxima, tiempo promedio de movimiento, tiempo total de recorrido, según se muestra en la Fig. 4.



Fig. 4 Estadística de un viaje Ruta Católica-Alpachaca

3.5 Estimación consumo de combustible instantáneo en los Autobuses

En la quinta etapa se realiza una estimación del consumo promedio e instantáneo de combustible de los autobuses. Para determinar el consumo promedio (kilómetros/galón) se aplica una encuesta a los conductores, allí se registran características generales del vehículo: marca del fabricante, modelo y carrocería; además se pregunta el valor monetario de la recarga diaria de combustible en cada ruta y el número de vueltas que realizan en la ruta cada día de trabajo. Como el precio del galón de diésel es fijo a \$1.03 se puede transformar fácilmente de unidad monetaria a unidad de volumen, es decir de dólares a galones de diésel. El dato de distancia en Kilómetros de cada ruta está preestablecido y es un dato que se levanta en la etapa anterior, como se muestra en la Tabla I.

La estimación del consumo instantáneo es un proceso más complejo, pues requiere determinar valores de consumo en cuatro estados del vehículo. El primero se denomina “ralenti”, es aquel cuando el vehículo está detenido pero su motor se encuentra funcionando en el régimen de giro mínimo. El segundo se conoce como “velocidad crucero”, es cuando el automotor circula con velocidad constante o con una tasa de variación de velocidad entre -0.1 m/s^2 y $+0.1\text{ m/s}^2$. El tercero es “aceleración”, allí el autobús está incrementando su velocidad, por lo general con una aceleración mayor o igual 0.1 m/s^2 . Y el último estado se denomina “desaceleración”, es la condición bajo la cual el vehículo disminuye su velocidad en una tasa negativa mayor -0.1 m/s^2 (Hung, 2005). En la Fig. 5 se muestran los cuatro estados de operación que puede tener el autobús en carretera.

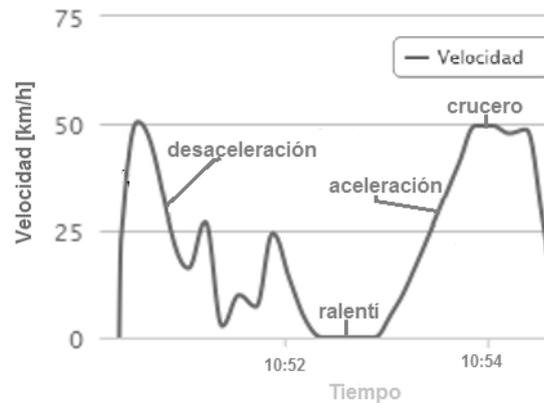


Fig. 5 Estados de operación de un vehículo

El consumo instantáneo debe ser calculado para cada modelo de vehículo que tengan las operadoras de transporte o al menos para los modelos que tienen mayor frecuencia en la flota de autobuses. Para estimar el consumo instantáneo en ralentí, se llena por completo el tanque de combustible del vehículo, y se mantiene funcionando el motor durante 30 minutos, en un régimen de giro de aproximadamente 750 rpm. Luego se vuelve a llenar el tanque midiendo el volumen que se ha consumido durante ese intervalo de 0.5 horas y así se puede establecer un valor de consumo, relacionando el volumen de combustible consumido para el tiempo de funcionamiento en ralentí del vehículo. Este proceso se realiza en varios autobuses de diferentes marcas de fabricante, y de allí se calcula un promedio para cada marca como se muestra en (3).

$$C_{C_{Ralentí}} = \frac{\sum_{m=1}^n (\Delta V_r)}{n(T_r)} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$C_{C_{Ralentí}}$ = consumo promedio de combustible en ralentí [ml/seg]

m = marca de autobús

ΔV_r = volumen de combustible consumido [ml]

T_r = tiempo de muestreo [seg]

El consumo instantáneo en velocidad cruceiro puede ser estimado de una forma similar al estado ralentí, igualmente se llena por completo el tanque de combustible del vehículo, y se busca un tramo de ruta donde el auto pueda circular a velocidad lo más constante posible, en un régimen de giro de alrededor de 2000 rpm o depende de la curva de consumo del motor del autobús; se sugiere buscar el régimen de giro para cuando el consumo de combustible es menor, normalmente esa zona de la curva se denomina "zona verde". La prueba se debe realizar mínimo durante 20 minutos. Finalmente se vuelve a llenar el tanque obteniendo el volumen consumido en ese intervalo de tiempo y el consumo puede ser estimado como se presenta en (4).

$$CC_{Crucero} = \frac{\sum_{m=1}^n (\Delta V_c)}{n(T_c)} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

$CC_{Crucero}$	= consumo de combustible promedio en crucero [ml/seg]
m	= marca de autobús
ΔV_c	= volumen de combustible consumido [ml]
T_c	= tiempo de muestreo [seg]

El cálculo del consumo instantáneo en estado de aceleración y desaceleración no se puede realizar por diferencia de volúmenes, ya que es un dato más dinámico. Obtener el modelo de consumo de combustible transitorio de un motor es difícil y siempre ha sido un punto crítico e importante para la investigación (Hongjie, 2015). Para ello se deben instalar dos sensores de caudal en el autobús, una debe estar en la línea de alimentación combustible y el otro en la línea de retorno. Los sensores deben ser ultrasónicos y tener una precisión de 1×10^{-4} litros/seg para lograr apreciar por diferencia de caudal en las líneas, el consumo de combustible del vehículo en un instante dado; una gran limitación en estos dispositivos es su costo. Por tal razón en el presente trabajo se estima valores promedio de consumo en estado de aceleración y desaceleración, los valores calculados están en función del consumo en ralentí, como se establece en (5) y (6).

$$CC_{Aceleración} = fa * CC_{Ralentí} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$CC_{Aceleración}$	= consumo de combustible promedio en aceleración [ml/seg]
fa	= factor relación consumo entre aceleración y ralentí
$CC_{Crucero}$	= consumo de combustible promedio en crucero [ml/seg]

$$CC_{Aceleración} = fa * CC_{Ralentí} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$CC_{Desaceleración}$	= consumo de combustible promedio en desaceleración [ml/seg]
fd	= factor relación consumo entre aceleración y ralentí
$CC_{Crucero}$	= consumo de combustible promedio en crucero [ml/seg]

A partir de valores de consumo promedio de vehículos pesados en los cuatro estados de conducción que se plantean en (Peñabaena-Niebles, 2015), se calculan los factores $fa=2.69(5.13)$ y $fd=2.15(4.52)$ requeridos en (5) y (6) respectivamente, para estimar el consumo de combustible en los autobuses. Esto factores se ajustan muy bien para calcular los consumos promedio de motores de combustión diésel, con potencias de entre 200HP y 300 HP. La mayoría de los

autobuses utilizados en la ciudad de Ibarra se encuentran dentro de este rango. Los factores f_a y f_d también pueden ser ajustados en función de los ciclos de conducción de cada ciudad según se plantea en (7). Por ello los promedios de consumo por estado de conducción en (Peñabaena-Niebles, 2015), se calcularon a partir de los ciclos de conducción desarrollados para la región de Hong Kong en (Tong, 1999). Allí los porcentajes de tiempo por estado son: en ralentí 31%, en aceleración 31%, en desaceleración 29 % y en cruce 9%.

En el presente trabajo, para comparar que los datos de f_a y f_b calculados a partir de (Tong, 1999), sirven para estimar el consumo de combustible por estado de operación de los autobuses de Ibarra, se levantan los datos reales de velocidad, distancia y tiempo mediante aplicaciones de GPS para teléfonos móviles, como se explica más adelante. Además se calculan las tasas de aceleración propias de los vehículos de transporte público de la ciudad. Así pues, se logra desarrollar algunas etapas necesarias de los ciclos de conducción para Ibarra. Luego mediante el procesamiento de dichos datos según (7), se encuentra el porcentaje del tiempo de operación en cada estado de conducción, y se puede confirmar que los valores f_a y f_d estimados para el presente trabajo son válidos.

$$f_a, f_d = \begin{cases} F_{CR}(ml/seg) - \text{ralentí} \\ F_{TR}(t) - \text{ralentí} \\ F_{TA}(t) - \text{aceleración} \\ F_{TD}(t) - \text{desaceleración} \\ F_{TC}(t) - \text{cruce} \end{cases} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

$F_{CR}(ml/seg)$ = consumo de combustible promedio en ralentí aceleración [ml/seg]

$F_{TR}(t)$ = proporción de tiempo de operación en ralentí [seg]

$F_{TA}(t)$ = proporción de tiempo de operación en aceleración [seg]

$F_{TD}(t)$ = proporción de tiempo de operación en desaceleración [seg]

$F_{TC}(t)$ = proporción de tiempo de operación en cruce [seg]

3.6 Cálculo del Consumo de Combustible por Intersecciones semaforizadas

En la última etapa se procesa y analiza la información recolectada, con el fin de estimar el consumo total de combustible de los autobuses en la Ruta Católica- Alpachaca, por efecto de las intersecciones semaforizadas de la ciudad según se plantea en (8) . Por ello el modelo propuesto se basa en la suma del consumo en tres estados de operación del autobús, no se considera el estado de cruce. Este tiempo puede ser separado en tres intervalos. El primero es aquel que se genera cuando el conductor ha observado el semáforo en rojo y empieza a disminuir la velocidad del vehículo hasta detenerse, allí el vehículo se encuentra en estado de desaceleración. Luego en el segundo intervalo de tiempo el autobús se ha detenido por completo y se mantiene en estado de ralentí esperando que cambie la luz del semáforo. El tercer intervalo se genera cuando la luz del semáforo cambia a verde, el automotor empieza a moverse y su estado de operación es de aceleración

$$CCS = \sum_{i=1}^n [Cs_R + Cs_A + Cs_D] \quad (Ec.8)$$

Donde:

Cs_R = consumo de combustible en ralentí [ml/seg]

Cs_A = consumo de combustible en aceleración [ml/seg]

Cs_D = consumo de combustible en desaceleración [ml/seg]

El consumo de combustible en estado de ralentí (Cs_R) es la cantidad de combustible consumido a causa del tiempo de espera en ralentí en todas las intersecciones semaforizadas i de la ruta y se puede definir mediante (9).

$$Cs_R = \sum_{i=1}^n [Cc_{Ralentí} * ts_R] \quad (Ec. 9)$$

Donde:

Cs_r = consumo de combustible en ralentí [ml/seg]

i = intersecciones semaforizada de la ruta

$Cc_{Ralentí}$ = consumo promedio de combustible en ralentí [ml/seg]

ts_R = tiempo espera en semáforos en ralentí [seg]

Se puede definir al término (Cs_A) como la cantidad de combustible consumido durante el tiempo de aceleración del autobús luego de haber estado en reposo, por efecto del tiempo de espera en las intersecciones semaforizadas i de la ruta y se define por la expresión (10).

$$Cs_A = \sum_{i=1}^n [Cc_{Aceleración} * ts_A] \quad (Ec. 10)$$

Donde:

Cs_A = consumo de combustible en aceleración [ml/seg]

i = intersecciones semaforizada de la ruta

$Cc_{Aceleración}$ = consumo promedio de combustible en aceleración [ml/seg]

ts_A = tiempo espera en semáforos en aceleración [seg]

Finalmente, Cs_D es el combustible empleado durante el periodo de tiempo de desaceleración del autobús, cuando este empieza a disminuir su marcha hasta llegar al reposo a causa de las intersecciones semaforizadas i de la ruta y puede calcularse según (11).

$$\sum_{i=1}^n [Cc_{Aceleración} * ts_A] \quad (Ec. 11)$$

Donde:

Cs_A = consumo de combustible en aceleración [ml/seg]

- i = intersecciones semaforizada de la ruta
- $CC_{Aceleración}$ = consumo promedio de combustible en aceleración [ml/seg]
- t_{SA} = tiempo espera en semáforos en aceleración [seg]

La metodología propuesta brinda un diagnóstico a la autoridad local de tránsito y transporte, para luego tomar medidas con el fin de disminuir el impacto de la utilización indiscriminada de semáforos en la ciudad. Entre ellas se puede mencionar la reprogramación de tiempos de ciclo de los semáforos, el remplazo de intersecciones semaforizadas por otro tipo de señales de prioridad de vía, y el control de la velocidad de circulación de los autobuses

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la caracterización de la flota vehicular de las dos operadoras de la ciudad de Ibarra, se puede observar en la Fig. 6 que existen vehículos con año de fabricación desde 1994 hasta el 2007, pero la mayor concentración se encuentra en el rango del 2001 hasta el 2004. De ello, el promedio del año de fabricación de los autobuses es 2002, con una antigüedad de la flota de alrededor de 15 años. La tecnología de estos motores ya no cumple con normativas internacionales de emisiones, tales como la Euro V o Euro VI, situación preocupante desde el punto de vista ambiental y económico. Al tener un alto consumo de combustible generan mayores cantidades de HC, CO, y NOx, que son gases que aceleran el efecto invernadero. Además, este consumo produce un gasto adicional al Estado Central, debido al subsidio que los combustibles tienen en el país.

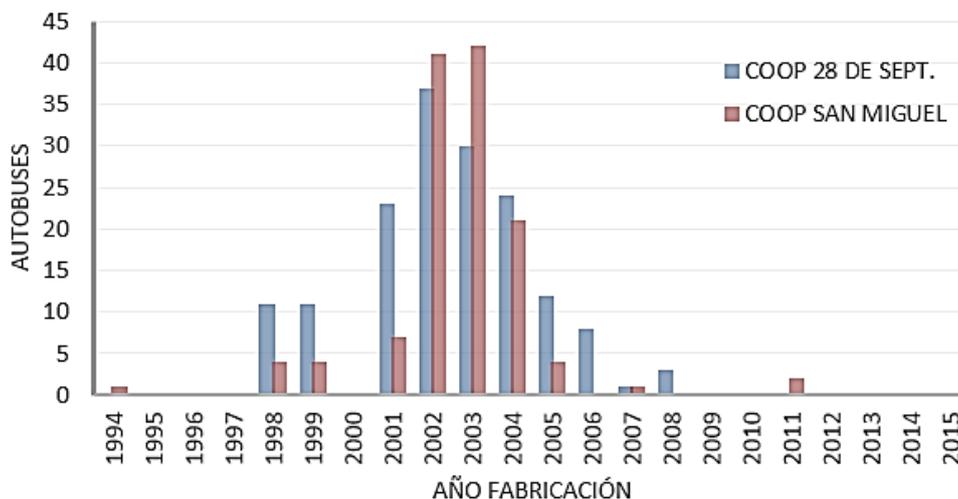


Fig. 6 Número de Autobuses por año de fabricación

En la flota de autobuses de la ciudad hay 12 marcas de fabricantes de autobuses, según se observa en la Fig. 2. Pero las marcas Chevrolet e Hino son las que tienen mayor número de unidades

con un 68% y un 15% respectivamente. Luego Volkswagen tiene un 8%, Mercedes-Benz 4% y el resto de marcas apenas un 5% del total de autobuses. De ello, es importante analizar el modelo de cada una de las marcas para caracterizar de mejor forma el tipo de vehículo que se utiliza en la ciudad.

En la Tabla II se muestran los porcentajes de cada modelo, el Chevrolet FTR y el Chevrolet CHR son los modelos más utilizados con un 51% y un 16% respectivamente. Es importante mencionar que los dos modelos tienen la misma serie de motor y sus chasises son similares, la única diferencia es que en el modelo FTR el motor está ubicado en la parte delantera y en el modelo CHR está en la parte posterior. Pero su Potencia, Torque y consumo de combustible para fines de estudio son iguales. El modelo Volkswagen 17210 también tiene una presencia importante con 22 unidades que representan el 8% de la flota total.

Tabla II. Caracterización por modelo de autobús

MARCA	MODELO	UNIDADES	%
Chevrolet	FTR 32M	147	51
Chevrolet	CHR 7.2	46	16
Volkswagen	17210	22	8
Hino	RK1JSTL	13	5
Mercedes –Benz	OF1721/59	12	4
Hino	FF1JPSZ	9	3
Hino	FD2HPSZ	9	3
Hino	GD11PTZ	9	3
Volvo	SUELTO	5	2
Otros		15	5
TOTAL		287	

Para el desarrollo del presente trabajo se eligió la ruta Católica-Alpachaca por tener el mayor número de semáforos por kilómetro recorrido y el mayor número de semáforos por tiempo de viaje. Además de las razones expuestas en la sección anterior. En esta ruta los valores de viaje promedio que se obtuvieron durante el periodo de monitoreo se muestran en la Tabla III. El Rendimiento de combustible es de 6.45km/galón, es un primer dato crítico identificado, el rendimiento promedio de Autobuses de 200-250 HP en condiciones urbanas suele ser al menos de 9km/galón. El bajo rendimiento de combustible en la ciudad no está relacionado directamente al estado mecánico de los vehículos, más bien se debe a los elevados tiempos de espera en ruta por diversos factores.

Tabla III. Datos promedio de la ruta Católica Alpachaca

DATOS	PROMEDIO	UNID.
Distancia de viaje	15.98	[Km]
Tiempo de viaje	88.3	[min]
Tiempo de movimiento	56.5	[min]
Vueltas diarias a la ruta	7.48	
Velocidad total viaje	11.09	[km/h]
Velocidad máxima	60.02	[km/h]

DATOS	PROMEDIO	UNID.
Velocidad de movimiento	18.33	[km/h]
Galones de combustible diario	54.48	[litros]
Rendimiento Combustible	6.45	[km/galón]
Consumo promedio	0.157	[g/seg.]

Los tiempos de espera en semáforos se levantan a bordo del vehículo y también de forma externa en la vía. En la Fig. 7 se muestra que el tiempo máximo diario de detención en una de las 55 intersecciones semaforizadas de la ruta es de 54 minutos, y el tiempo diario de detención por otros factores en el transcurso de dos intersecciones tiene un valor máximo de 4h19m32s horas. Además, el tiempo total diario de detención e las 55 intersecciones semaforizadas es de 17h17m08s, mientras que los otros tiempos de espera suman un total de 22h53m20s. De ello, se puede notar que los autobuses permanecen en reposo un 32,4% más debido a otros factores de espera respecto a las esperas por semáforos. Los otros tiempos de espera están asociados a demoras en zonas de paradas a la espera de abordaje de más pasajeros. También se notó que existen detenciones innecesarias en algunas intersecciones semaforizadas, pues allí el flujo vehicular es bajo y no se justifica la utilización de semáforos.

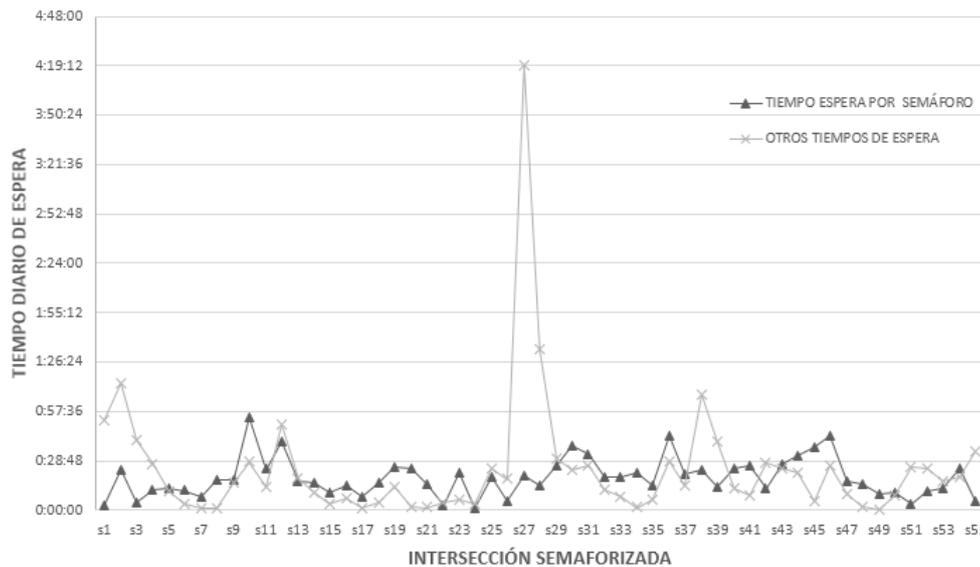


Fig. 7 Tiempos de espera por semáforos y otras causas.

Para determinar el consumo instantáneo en los autobuses se aplicó la metodología descrita en la sección anterior. Los porcentajes promedio de estado de conducción en la ruta que se obtienen a partir de procesar los datos de más de 500 vueltas a la ruta realizadas por los diferentes autobuses durante el periodo de monitoreo. En la Fig. 8 se muestra un ejemplo de los datos de velocidad y tiempo levantados para una vuelta de la Ruta Católica – Alpachaca.

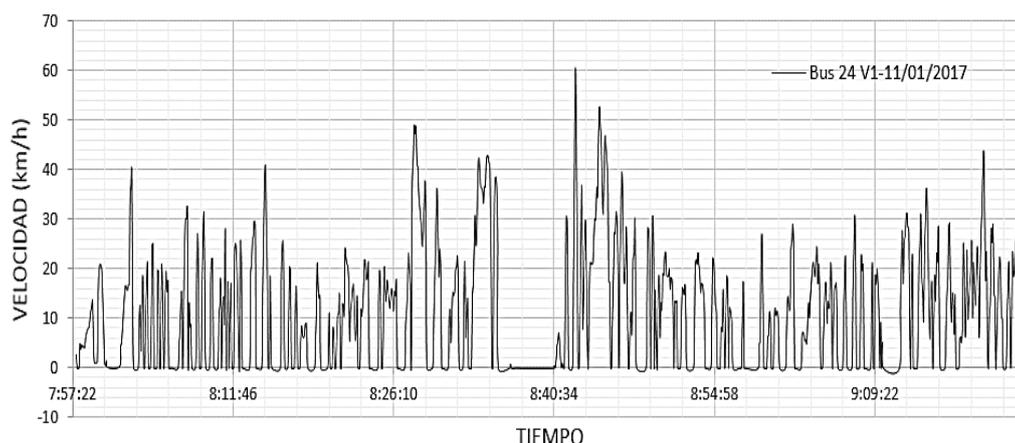


Fig. 8 Estados de operación Ruta Católica-Alpachaca

Luego de procesar la información, se obtiene que los autobuses la mayor parte del tiempo de funcionamiento se encuentran en estado de ralenti con un 36.2%. A pesar de que la ruta analizada cubre zonas urbanas de la ciudad, que tienen tráfico y congestión moderado, se denota un elevado tiempo total del vehículo en reposo, considerando que el motor encendido y generando un consumo de combustible innecesario. Así pues, se identifica que el exceso de intersecciones semaforizadas y de paradas para abordar o dejar pasajeros son los factores que generan los tiempos excesivos de reposo y demoras en los tiempos de viaje de los usuarios del sistema de autobuses de la ciudad. El estado de aceleración y desaceleración tienen un 27,3% y un 22.8% respectivamente. El estado de velocidad crucero es el menor con un porcentaje del 13.7%. Otros datos adicionales se presentan en la Tabla IV.

TABLA IV. RESULTADO ESTADOS DE CONDUCCIÓN
RUTA CATÓLICA ALPACHACA

ESTADO	PORCE. [%]	TIEMPO [min]	DISTANCIA [Km]	ACEL. [m/s ²]
Ralenti	36.2%	31,6	5,8	
Aceleración	27.3%	23,8	4,3	+0.44
Desaceleración	22.8%	19,9	3,6	- 0.57
Crucero	13.7%	12,0	2,2	0.1

El consumo de combustible instantáneo calculado a partir de las (Ec. 3), (Ec. 4), (Ec. 5) y (Ec. 6) en cada uno de los estados de conducción y para los cuatro principales modelos de autobuses se muestran en la Fig. 9. Allí se puede notar que en los cuatro estados el Modelo Volkswagen 17210 tiene un promedio de un 16% más de consumo respecto al Modelo Chevrolet FTR o al Chevrolet CHR. que tiene consumos similares. El Hino GD es el vehículo de menor consumo, utiliza un 19% menos de combustible respecto a los modelos Chevrolet.

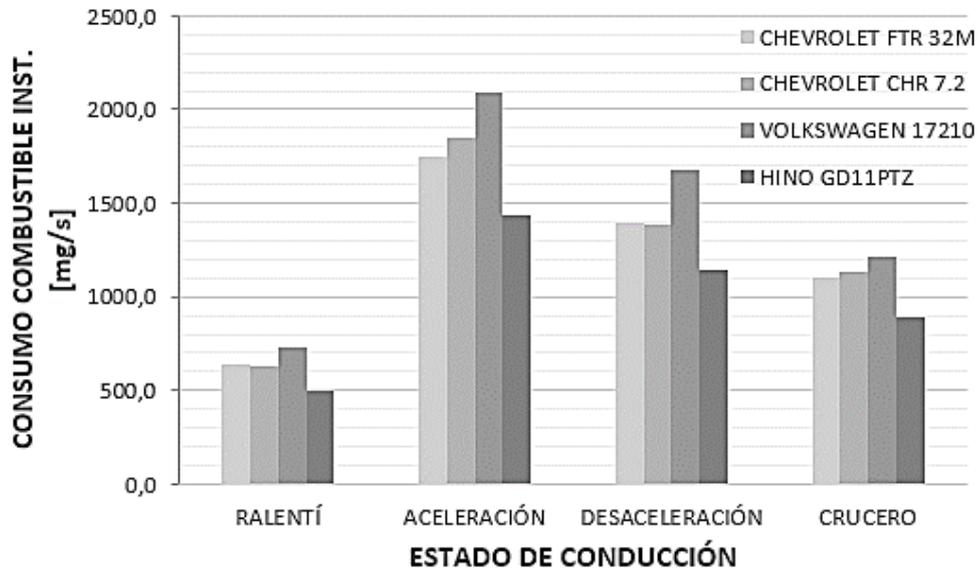


Fig. 9 Consumo combustible promedio por estado de operación

A partir de los promedios de consumo de combustible por estado y los tiempos de espera en semáforos, se estimó el consumo de combustible de los Autobuses por efecto de cada intersección semaforizada y de otros factores como se muestra en la gráfica. En la Ruta Católica – Alpachaca los 13 autobuses que laboran diariamente consumen alrededor de 700 litros. De acuerdo a la Fig. 10 se puede notar que los semáforos causan el 22% del consumo, las paradas por otros factores tales como abordaje de pasajeros consumen el 8% y el 70% de consumo restante se origina por el combustible demandado para el desplazamiento de los autobuses en la ruta.

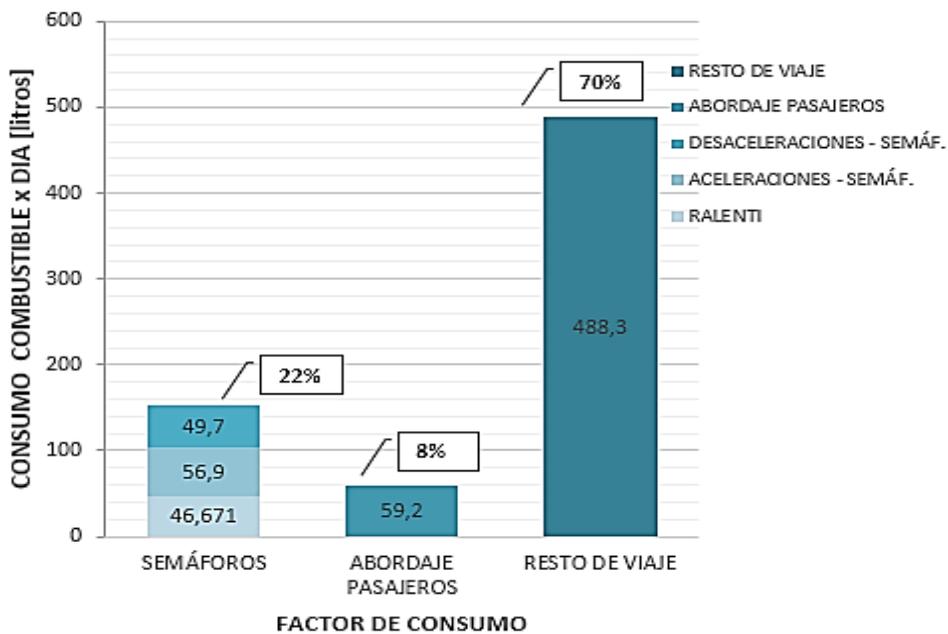


Fig. 10 Consumo combustible por factor de consumo

Finalmente se clasifican a las 55 intersecciones semaforizadas de la Ruta de acuerdo a su ubicación. Al primer grupo corresponden las intersecciones ubicadas en el hipercentro de la ciudad, allí se encuentran 43. Al segundo grupo pertenecen las intersecciones ubicada en la zona periférica de la ciudad, son las 12 intersecciones restantes. En base al análisis de flujo vehiculares y tiempos de espera en cada tipo de intersección semafórica se ha identificado que al menos el 25 % de ellas no son innecesarias. Por ello, deberían ser reemplazadas por algún otro tipo de señal de prioridad, principalmente por señales de ceda el paso. Si se reemplazara el tipo de señal de prioridad en se podría tener una disminución de un 22 % del combustible consumido actualmente por efecto de las intersecciones semaforizadas; además, si se compara respecto al consumo total en la ruta se tendría una disminución del 6 %.

Considerando que la flota de autobuses de la ciudad es de 287 unidades se estima que el consumo de combustible Diesel es de 115.000 galones por mes y 1.400.000 galones anuales. Si en Ibarra se aplicaría una reestructuración de las intersecciones semaforizadas de la ciudad, anualmente se podría ahorrar alrededor de 85.000 galones. En términos monetarios le representaría al Gobierno Central un ahorro de \$150.000 solo considerando la flota de autobuses de la ciudad de Ibarra . Dichos fondos podrían ser destinados a la repotenciación de la misma infraestructura del Transporte Público o a su vez para el mejoramiento de la Flota de Autobuses.

5. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha investigado el efecto de las intersecciones semaforizadas en el consumo de los autobuses urbanos de la ciudad de Ibarra. La marca Chevrolet con sus series FTR y CHR tiene una mayor presencia en el parque de autobuses de la ciudad con un 67% . El rendimiento promedio del combustible de la flota vehicular es de 6,45 galones/km; un rendimiento muy bajo comparado a autobuses modernos utilizados en otros países. El Hino GD es el modelo de menor consumo, con un 38% menos respecto al modelo Volkswagen 1721 que es el de mayor consumo y con un 18% menos que los Chevrolet FTR y CHR. Los autobuses de la ciudad en promedio permanecen el 36,2% de tiempo en estado de ralentí, el 22,8% en aceleración, el 27,3% en desaceleración y el 13,7% en crucero. Los estados de conducción determinados son similares a los datos de hace 20 años en ciudades asiáticas como Hong Kong, por ello las autoridades locales deberían tomar medidas para evitar que en el futuro Ibarra tenga los graves problemas de movilidad que actualmente aquejan a dichas ciudades. Los tiempos de espera en los semáforos son menores que los tiempos utilizados por los conductores en paradas para esperar el abordaje de más pasajeros. Así pues, las intersecciones semaforizadas causan el 22% del consumo total de combustible. Si se reemplazaría el 25% de intersecciones semaforizadas por otro tipo de señal de prioridad se lograría tener una disminución de apenas el 6% de consumo de combustible. Por ello, para lograr reducciones significativas en el consumo se debería optar por seleccionar autobuses con motores eficientes de menor cilindrada y mejor tecnología.

En el futuro se recomienda desarrollar varios estudios, el primero enfocado en estimar la disminución de combustible que se lograría tener en una ciudad, utilizando autobuses de menor cilindrada. Otro tema de estudio planteado sería evaluar la eficiencia del consumo de combustible de los autobuses respecto a la tasa de ocupación de pasajeros.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cevallos, J. (2016): "Estimating road transport fuel consumption in Ecuador", *Energy Policy*, Vol. 92, May 2016, p. 359-368.
- Chen, C. (2015): "B planner:Night bus route planning using large-scale taxi gps traces" in *PerCom*. IEEE, 2013, pp. 225–233.
- Cubukcu, K.M., (2008): "Examining the cost structure of urban bus transit industry: does urban geography help J. Transp. Geogr". p16, 278–291.
- de Abreu e Silva, J. (2015): "Consumption by an urban bus operator: Bus route, driver behavior or vehicle type?". *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 38, July 2015, p. 94-104.
- de Abreu e Silva, J. (2015): "Consumption by an urban bus operator: Bus route, driver behavior or vehicle type?". *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 38, July 2015, p. 94-104.
- Hongjie, M., Hui, X. (2015): "Effects of driving style on the fuel consumption of city buses under different road conditions and vehicle masses", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 41, December 2015, p.205-216,
- Hu, Y., Lin, W., Chen, G., and Yang, Y. (2012): "Characteristics of Fuel Consumption and Vehicular Operation of Buses in Taipei's Exclusive Bus Lanes". *Sustainable Transportation Systems*, 2012, pp. 168-175.
- Hung, W. T., Tong, H.Y. (2005): "A modal approach to vehicular emissions and fuel consumption model development". *J. Air Waste Manage. Assoc.* 55, 2005, p.1431–1440.
- IEA, (2012): "Key World Energy Statistics 2012". IEA – International Energy Agency. <<http://www.iea.org/>> , 2012.
- Peñabaena-Niebles, R. (2015): "Impact of transition between signal timing plans in social cost based in delay, fuel consumption and air emissions", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 41, December 2015, p.445-456.
- Tang, T.Q., Li, J.G. (2015): "Effects of on-ramp on the fuel consumption of the vehicles on the main road under car-following model", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 419, February 2015, p.293-300.
- Tong, H.Y., Hung, W.T. (1999): "Development of a driving cycle for Hong Kong", *Atmospheric Environment*, Vol. 33, Issue 15, 1999, p.2323-2335.

Várhelyi, A. (2002): "The effects of small roundabouts on emissions and fuel consumption: a case study", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 7, Issue 1, January 2002, p.65-71.